Computerul și creierul

JOHN VON NEUMANN (1903-1957) a fost unul dintre cei mai importanți matematicieni ai secolului al XX-lea, cu contribuții importante la fizica cuantică, analiza funcțională, teoria mulțimilor, topologie, economie, informatică, analiza numerică, hidrodinamica exploziilor, statistică și alte sfere ale matematicii.

S-a născut la Budapesta și s-a dovedit un copil prodigios, învățând analiză matematică încă de la vârsta de opt ani. A studiat în Ungaria și Germania, obținând în 1925 licența în chimie, iar în 1926 doctoratul în matematică. Din 1932 se mută în Statele Unite, pentru a-și începe activitatea în cadrul Institutului pentru Studii Avansate de la Princeton.

Este renumit pentru teoria jocurilor, pentru munca sa la Electronic Computer Project de la Institutul pentru Studii Avansate și a fost membru al Comisiei pentru Energie Atomică din SUA.

John von Neumann

Computerul si creierul

T

Cuvant înainte la ediția a treia de
RAY KURZWEIL
Cuvânt înainte la ediția a doua de
PAUL si PATRICIA CHURCHLAND
Prefață de
KLARA VON NEUMANN
Traducere din engleză de
ALINA LUCA

CURTEA VECHE

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României NEUMANN, JOHN von

Computerul ți creierul / John von Neumann ;
cuv. înainte la ed. a 3-a de Ray Kurzweil ; cuv. înainte la ed. a 2-a de Paul și Patricia Churchland ; pref, de Klara von Neumann ; trad, din engleza de Alina Luca. - București : Curtea Veche Publishing, 2022 Conține bibliografie
ISBN 978-606-44-1222-5
I. Kurzweil, Ray (pref.)
II. Churchland, Paul (pref.)
III. Churchland, Patricia (pref.)
IV. Neumann, Klara von (pref.)
V. Luca, Alina (trad.)
004
ISBN epub: 978-606-44-1228-7 Carte publicată și în ediție digitală
Redactor: Cătălina Manolache Corector: Elena Tătaru Tehnoredactor: Irinel Niculae Copertă: Gabi Toma Consultant de specialitate: Andrei Alexandru Trandafir
Coordonarea ediției: Anca-Maria Pănoiu
CURTEA VECHE PUBLISHING

str. Aurel Vlaicu nr. 35, București, 020091 redacție: 0744 55 47 63
distribuție: 021 260 22 87, 021 222 25 36, 0744 36 97 21
redactie@curteaveche. ro; comenzi@curteaveche.ro curteaveche.ro
JOHN VON NEUMANN *The Computer & The Brain*
© 1958 by Yale University Press
© renewed 1986 by Marina von Neumann Whitman Foreword to the Second Edition copyright © 2000 by Yale University Foreword to the Third Edition copyright © 2012 by Ray Kurzweil Originally published by Yale University Press
All rights reserved.
© CURTEA VECHE PUBLISHING, 2022 pentru prezenta versiune în limba română

Cuprins

Cuvânt înainte la ediția a treia 9
Cuvânt înainte la ediția a doua 33
Prefața 46
Introducere 54
Partea I. Computerul **56**
Procedura analogicd 57
Operații de bază convenționale
Operații de bază neconvenționale
Procedura digitala 60
Markerii - combinarea și manifestarea lor
Tipurile de calculatoare digitale și componentele lor de bază
Scheme în paralel și în serie
Operațiile de bază convenționale
Controlul logic 65
Controlul prin întrerupător electric
Controlul logic al benzilor
Principiul unei singure componente
pentru fiecare operație de bază
Necesitatea corespunzătoare
pentru o componentă specială de memorie
Controlul prin puncte de „control secvențial"
Controlul stocat în memorie
Modul de operare al controlului stocat în memorie Forme combinate de control
Proceduri numerice combinate 78
Reprezentări combinate ale numerelor.
Dispozitive construite în această bază
Precizia 81
Motive pentru cerințele deînaltă precizie (digitală)
Caracteristici ale calculatoarelor analogice moderne 85
Caracteristici ale calculatoarelor digitale moderne 86

Componentele active, aspecte legate de viteză
Numărul necesar de componente active
Componente de memorie, timpi de acces
și capacități ale memoriei
Registre de memorie construite din componente active
Principiul ierarhic pentru componentele de memorie
Componentele de memorie, aspecte legate de acces
Complexitatea conceptului de timp de acces
Principiul adresării directe
Partea a II-a. Creierul uman **98**
Descrierea simplificatâ a funcției neuronului 100
Natura impulsului nervos 100
Procesul stimulării
Mecanismul inducerii de impulsuri succesive;
caracterul digital al acestuia
Caracteristicile temporale ale răspunsului nervos, oboseala și refacerea
Mărimea unui neuron.
Comparație cu componentele artificiale
Disiparea energiei.
Comparație cu componentele artificiale
Rezumatul comparației
Criteriile de stimulare 114
Cel mai simplu - logică elementară
Criterii de stimulare mai complicate
Pragul
Timpul de însumare
Criterii de stimulare pentru receptori
Problema memoriei în cadrul sistemului nervos 123
Principii pentru estimarea capacității memoriei în sistemul nervos
Estimâri ale capacității memoriei în baza acestor stipulâri
Diverse posibile materializâri fizice ale memoriei
Analogie cu dispozitivele de calcul artificiale
Componentele de bazâ ale memoriei nu trebuie sâ fie neapârat identice
cu componentele active de bazâ
Părți analogice și digitale din cadrul sistemului nervos 131
Rolul mecanismului genetic în contextul menționat anterior
Codurile și rolul lor în controlarea funcționarii
unui dispozitiv de calcul 133
Conceptul de cod complet
Conceptul de cod scurt

Funcționarea unui cod scurt
Structura logica a sistemului nervos 138
Importanța procedurilor numerice
Interacțiunea procedurilor numerice cu logica
Motive pentru care ne așteptâm la cerințe de înaltâ precizie
Natura sistemului de notații implicate:
nu digital, ci statistic 141
Deteriorarea aritmeticâ. Rolurile adâncimilor aritmetice și logice
Precizie aritmeticâ sau siguranțâ logicâ, alternative
Alte trâsâturi statistice ale sistemului de mesaje care ar putea fi folosit
Limbajul creierului, nu limbajul matematicii 145

Cuvant înainte la ediția a treia

Tehnologiile informației au transformat deja fiecare fațetă a vieții omenești, de la domeniul afacerilor până la cel al politicii sau al artelor. Dată fiind dezvoltarea inerent exponențială, în termeni de preț-performanță[1] și capacitate, a oricărei forme de tehnologie informațională, era informațională își extinde încontinuu sfera de influentă. Probabil cel

> >

mai important proces informațional care merită cercetat e inteligența umană însăși, iar cartea de față reprezintă poate cea mai timpurie examinare serioasă a relației dintre gândirea noastră și computer și îi aparține matematicianului care a elaborat arhitectura fundamentală a erei computerului.

1 Termen din economie care se referă la raportul dintre prețul și performanța unui produs. *(N. trad.)*

In ambițiosul proiect al studierii creierului uman, înregistrăm accelerat succese în realizarea ingineriei inverse[2] a paradigmelor gândirii și aplicăm aceste metode inspiratedin biologie pentru a crea dispozitive din ce în ce mai inteligente. Inteligența artificială (IA) gândită astfel va întrece în cele din urmă gândirea umană fără îmbunătățiri. După părerea mea, scopul acestui proces nu e o înlocuire a noastră, a oamenilor, ci extinderea posibilităților a ceea ce este deja o civilizație om-mașinărie. Este ceea ce face din specia noastră o specie unică.

Așadar, care sunt ideile-cheie care stau la baza acestei ere informaționale? Eu am numărat cinci astfel de idei. John von Neumann e responsabil pentru trei dintre ele și a avut o contribuție fundamentală în privința celei de-a patra. Claude Shannon a rezolvat problema fundamentală a siguranței informației. Alan Turing a demonstrat și definit universalitatea calculului și a fost influențat de o prelegere timpurie a lui von Neumann. Pornind de la studiile lui Turing și Shannon, von Neumann a creat dispozitivul care îi poartă numele, ce a devenit - și a rămas - arhitectura fundamentală pentru sistemele de calcul.

In acest volum așa-zis modest pe care îl ții în mână, von Neumann articulează modelul său de calcul si

2Studierea unui obiect astfel încât să i se determine modul intern de funcționare sau cel în care a fost fabricat. *(N. trad.)*

definește echivalența esențială dintre creierul omenesc și computer. Atrage atenția asupra aparent uriașelor diferențe de structură, dar aplicând principiul echivalenței dintre toate formele de calcul elaborat de Turing, von Neumann imaginează o strategie prin care să poată fi înțelese, în termeni de calcul, metodele creierului, să poată fi recreate aceste metode și, în cele din urmă, să le poată fi mărită puterea. Cartea e în mare parte profetică, având în vedere că a fost scrisă cu mai bine de jumătate de secol în urmă, într-o perioadă în care neuroștiințele aveau la dispoziție doar instrumente foarte primitive. In cele din urmă, von Neumann anticipează accelerarea esențială a tehnologiei și consecințele ei inevitabile în transformarea singulară a existentei omului. Să trecem în revistă, într-un mod ceva mai detaliat, aceste cinci idei de bază.

Prin 1940, dacă rosteai cuvântul „calculator", lumea ar fi presupus că te referi la un „calculator analogic". Numerele erau reprezentate de diferite niveluri de tensiune electrică, iar componentele specializate puteau efectua operațiuni aritmetice precum adunarea și înmulțirea. Totuși, exista un mare impediment, legat de precizia acestor calculatoare analogice. Numerele puteau fi reprezentate cu o precizie de doar o parte dintr-o sută și, fiindcă nivelurile de tensiune ce reprezentau numerele erau procesate de tot mai mulți operatori matematici, aceste erori continuau să se

acumuleze. Dacă voiai să efectuezi mai mult de câteva calcule, rezultatele ajungeau atât de inexacte, încât nu aveau niciun sens.
Oricine ține minte zilele în care se copia muzică folosind bandă analogică își poate aminti de următoarea problemă. La prima copiere apărea o degradare perceptibilă - un zgomot de fond pe care originalul nu-1 avea („zgomotul" reprezintă inexactitățile aleatorii). O copie a unei copii era și mai „zgomotoasă", iar copia de la a zecea generație era aproape numai zgomot de fond.
S-a presupus că aceeași problemă va afecta și nou apăruta lume a computerelor digitale. Putem percepe problema respectivă dacă ne gândim la comunicarea unor informații digitale printr-un canal. Niciun canal de comunicație nu e perfect și vom avea un anumit procent inerent de erori. Să zicem că avem un canal cu o probabilitate de 0,9 de a transmite în mod corect fiecare bit de informație. Așadar, dacă trimit un mesaj cu lungimea de un bit, probabilitatea transmiterii lui exacte prin respectivul canal va fi de 0,9. Dar dacă trimit doi biți? In acest caz, precizia este de $0,9^2 = 0,81$. Cum ar fi să trimit un *byte* (opt biți)? Am mai puțin de o șansă egală (mai exact, 0,43) să îl trimit corect. Probabilitatea de a trimite cinci *bytes* fără nicio eroare e de 1 la sută.
O modalitate evidentă de a ocoli problema e de a crește acuratețea canalului. Să presupunem că

acesta generează o singură eroare la un milion de biți. Dacă trimit un fișier cu o jumătate de milion de *bytes* (dimensiunile unui program mic sau ale unei baze de date modeste), probabilitatea transmiterii corecte e mai mică de două procente, în ciuda preciziei extrem de ridicate a canalului. Având în vedere că o eroare de un singur bit poate invalida complet un program sau alte forme de date digitale, aceasta nu este o situație acceptabilă. Indiferent de precizia canalului de comunicare, de vreme ce posibilitatea unei erori în transmisie crește rapid odată cu mărimea mesajului, problema pare imposibil de rezolvat.

Calculatoarele analogice abordează această problemă printr-o degradare progresivă. Și ele acumulează erori prin utilizarea sporită, dar dacă limităm calculele la un anumit set limitat, aceste calculatoare se pot dovedi oarecum utile. Cele digitale, pe de altă parte, necesită comunicare neîntreruptă, nu doar de la un calculator la altul, dar si în interiorul aceluiași calculator. Există o comuni- > >

care între memorie și unitatea centrală de procesare. In interiorul acestei unități, există o comunicare de la un registru la altul, precum și un du-te-vino la unitățile aritmetice ș.a.m.d. Chiar și într-o unitate aritmetică există o comunicare între multiple registre. Comunicarea e omniprezentă la toate nivelurile. Dacă avem în vedere că procentul de erori crește rapid odată cu intensificarea comu-

nicării, și că o singură eroare de un bit poate distruge integritatea unui proces, calculul digital e sortit pieirii - sau cel puțin așa părea Ia acea vreme. Trebuie reținut faptul că aceasta a fost părerea comună până a apărut Shannon cu prima idee-cheie a erei informaționale. El a demonstrat cum putem crea o comunicare arbitrar de exactă utilizând cele mai instabile canale de comunicare. Iată ce zicea Shannon în studiul său (azi de referință) intitulat „A Mathematical Theory of Communication", publicat în *Bell System Technical Journal* în iulie și octombrie 1948, și în special în teorema codării canalului zgomotos elaborată de el: dacă ai la dispoziție un canal cu orice fel de procentaj de eroare (exceptându-1 exact pe cel cu 50 de procente per bit, ceea ce ar însemna că acel canal transmite zgomot digital pur), poți transmite un mesaj făcând procentul de eroare atât de exact cât vrei. Sau, cu alte cuvinte, procentul de eroare poate fi un bit din *n* biți, unde *n* poate fi oricât de mare dorești. De exemplu, la extremă, dacă ai un canal care transmite biți de informație corectă doar în 51 la sută din timp (adică, transmite bitul corect doar un pic mai des decât pe cel incorect), tot poți transmite mesaje astfel încât doar un bit dintr-un milion să fie incorect, sau un bit dintr-un trilion, sau dintr-un trilion de trilioane.

Cum e posibil așa ceva? Răspunsul este: prin redundanță. Acesta pare evident acum, dar nu la fel stăteau lucrurile pe atunci. Un exemplu simplu:

dacă transmiți fiecare bit de trei ori și votezi în privința majorității, vei îmbunătăți substanțial siguranța rezultatului. Dacă nu e suficient, sporește redundanța până obții precizia pe care o dorești. Ideea de a repeta pur și simplu informația e cel mai simplu mod de a obține procente de precizie oricât de mari din canale cu mult zgomot, însă această abordare nu e cea mai eficientă. Lucrarea lui Shannon a stabilit domeniul teoriei informației și a prezentat metode optime pentru coduri de detecție și corectare a erorilor care pot obține exactitatea vizată prin orice canal non-aleatoriu.
Cititorii mai în vârstă își amintesc de modemurile telefo- nice care transmiteau informația prin linii analogice zgomotoase, care includeau tot felul de șuierături, zgomote seci și alte forme de distorsiune, dar chiar și așa puteau transmite datele digitale într-un procent mare, datorită teoremei lui Shannon despre canalul zgomotos. Aceeași problemă și aceeași soluție există pentru memoria digitală. Te-ai gândit vreodată cum se face că CD-urile, DVD-urile și discurile care conțin programe continuă să dea rezultate pe care te poți baza chiar și după ce au fost scăpate pe jos sau zgâriate? Din nou, îi putem mulțumi lui Shannon pentru asta. Calculul constă în trei elemente: comunicarea (care, așa cum am menționat, este prezentă permanent atât în interiorul unui computer, cât și între computere), memoria și așa-numitele porți logice (care efectuează funcții aritmetice și logice). Precizia de funcționare a

acestora din urmă poate fi și ea mărită oricât, folosindu-se în mod similar coduri de detectare si corectare a >
erorilor. Datorită teoremei lui Shannon, putem gestiona algoritmi și date digitale oricât de mari, fără ca procesele să fie întrerupte sau distruse de erori.

A doua idee importantă pe care se bazează era informației este universalitatea calculului. In 1936, Alan Turing descrie „mașinaTuring[4], care nu e de fapt un dispozitiv real, ci un experiment de gândire. Calculatorul său teoretic constă într-o bandă infinită de memorie cu valorile 1 si 0 înscrise >
în fiecare pătrat. Datele de intrare pentru dispozitiv sunt furnizate pe această bandă. Dispozitivul citește banda câte un pătrat pe rând. Dispozitivul conține și un tabel de reguli - în esență, un program stocat. Regulile constau în stări numerotate. Fiecare regulă specifică o acțiune dacă pătratul e citit ca 0 și o alta dacă pătratul e citit ca 1. Printre acțiuni se numără scrierea unui 0 sau a unui 1 pe bandă, deplasarea benzii cu un pătrat spre dreapta ori spre stânga sau oprirea procesării benzii. Apoi, fiecare stare specifică numărul următoarei stări în care trebuie să se afle dispozitivul. Când dispozitivul se oprește, se consideră că el a terminat de rulat algoritmul, iar datele de ieșire ale acestuia rămân înscrise pe bandă. Deși, teoretic, banda e infinită, fiecare program (care nu intră într-o buclă infinită) lucrează doar pe o porțiune finită a benzii, astfel încât dacă ne limităm la o

memorie finită, dispozitivul tot rezolvă un set important de probleme.
Dacă „mașina Turing" îți sună rudimentar, chiar acesta a fost obiectivul lui Turing. A vrut ca dispozitivul său să fie cât mai simplu posibil (dar nu mai simplu de atât, ca să-l parafrazăm pe Einstein). Turing și fostul său profesor Alonzo Church au dezvoltat teza Church-Turing, conform căreia dacă o problemă prezentată unei mașini Turing nu poate fi rezolvată de o mașină Turing, atunci ea nu poate fi rezolvată de *niciun* alt dispozitiv, conform legilor naturii. Cu toate că dispozitivul are doar câteva comenzi și procesează doar un bit o dată, e capabil să calculeze tot ce poate calcula orice alt calculator. Interpretările „puternice" ale tezei Church-Turing propun o echivalență esențială între ce poate gândi sau cunoaște o ființă omenească și ce poate fi calculat de un dispozitiv. Ideea de bază e următoarea: creierul omenesc e supus legilor naturale și, astfel, procesarea informației de care e capabil nu o poate întrece pe cea a unui dispozitiv de calcul computațional (și, prin urmare, nici pe a unei mașini Turing).
îi putem recunoaște lui Turing meritul de a fi stabilit, odată cu lucrarea din 1936, fundamentul teoretic al calculului computațional, dar e important de menționat că Turing a fost puternic influențat de o prelegere ținută de John von Neumann la Cambridge, în Anglia, în 1935, despre conceptul de program stocat, concept înglobat în

mașina Turing. La rândul său, von Neumann a fost influențat de studiul din 1936 al lui Turing, care prezenta într-un mod elegant principiile calculului computațional, și La pus pe lista lecturilor obligatorii pentru colegii săi la sfârșitul deceniului al patrulea și începutul celui de-al cincilea.
în același studiu, Turing vorbește despre o altă descoperire neașteptată, cea a problemelor nerezolvabile. Sunt problemele bine definite și cu răspunsuri unice a căror existență poate fi dovedită, dar care nu vor putea fi rezolvate niciodată de o mașină Turing — adică de *niciun* dispozitiv de calcul -, ceea ce reprezintă o răsturnare a unei convingeri din secolul al XIX-lea, conform căreia dacă o problemă poate fi definită, atunci poate fi și rezolvată până la urmă. Turing a demonstrat că există tot atâtea probleme nerezolvabile câte sunt rezolvabile. Kurt Gôdel a ajuns la o concluzie asemănătoare în „Teorema incompletitudinii“ elaborată de el în 1931.
Rămânem astfel în situația uluitoare de a fi capabili să definim o problemă, să demonstrăm că există un răspuns unic în ce o privește și, cu toate acestea, să știm că acel răspuns nu va fi descoperit niciodată.
Se mai pot spune multe despre implicațiile filozofice ale operelor lui Turing, Church și Gôdel, dar având în vedere ce își propune această prefață, e suficient să spunem că Turing a demonstrat următorul lucru: calculul computațional se bazează

în esență pe un mecanism foarte simplu. Fiindcă mașina Turing (și, prin urmare, orice computer) e capabilă să-și fundamenteze cursul acțiunii viitoare pe rezultate pe care le-a calculat deja, e capabilă să ia decizii și să modeleze ierarhii de informații oricât de complexe.
Turing a proiectat și finalizat ceea ce este probabil primul computer, numit Colossus, în decembrie 1943, pentru a decoda mesajele criptare de dispozitivul de criptare nazist Enigma. Era conceput să execute o singură sarcină și nu putea fi reprogramat pentru o alta. Dar a executat în mod strălucitor acea sarcină si i s-a recunoscut meritul de a le fi conferit Aliaților prilejul de a depăși avantajul de 3:1 pe care îl avea LuftwafFe-ul german asupra forțelor aeriene regale britanice, ajutându-i pe Aliați să câștige decisiva Bătălie a Angliei.
Pe aceste fundamente a creat John von Neumann arhitectura computerului modern, „mașina von Neumann", care a rămas structura de bază a oricărui computer în următorii 66 de ani, de la microcontrolerul din mașina ta de spălat până Ia cel mai mare supercalculator. Aceasta e a treia idee-cheie a erei informației. Intr-un articol apărut în 30 iunie 1945, intitulat „First Draft of a Report on the ED VAC", von Neumann a expus conceptele care au ajuns să domine teoriile calculului din acel moment și până în prezent. Modelul von Neumann include o unitate centrală de procesare în care erau

efectuate operațiunile aritmetice și logice, o unitate de memorie în care erau stocate programul și datele, un dispozitiv de stocare în masă, un *program counter*[3] și canale de intrare și ieșire a datelor. Această concepție e descrisă în prima jumătate a acestei cărți. Deși inițial a fost conceput ca un document de proiect intern, studiul lui von Neumann a devenit materialul de referință pentru dezvoltatorii de computere în anii 1940 și 1950 și, într-adevăr, a influențat construirea oricărui computer de atunci încolo.

Mașina Turing n-a fost concepută să fie una practică. Turing nu era preocupat de eficiența rezolvării de probleme, ci mai degrabă de examinarea ariei de probleme care pot fi rezolvate prin calcul. Scopul lui von Neumann era să creeze un concept practic de dispozitiv de calcul. Conceptul său a înlocuit calculele de un bit ale lui Turing cu cuvinte de mai mulți biți (în general, multiple de opt biți). Banda de memorie a lui Turing era secvențială, astfel încât programele dispozitivului său consumau exagerat de mult timp deplasând banda înainte și înapoi pentru a stoca și accesa rezultatele intermediare. Spre deosebire de aceasta, dispozitivul lui von Neumann avea memorie cu acces aleatoriu*, astfel încât orice

3 Intr-un procesor, un *program counter* (engl.) este un registru care conține adresa-memorie a instrucțiunii în curs de executare. (A *traci}*

element de informație putea fi restabilit imediat.
Unul dintre conceptele-cheie ale lui von Neumann este programul stocat, pe care îl prezentase cu un deceniu mai devreme: programul e stocat în același tip de RAM ca datele (și adeseori în același bloc de memorie). Asta ne permite să reprogramăm computerul pentru sarcini diferite. Mai mult decât atât, îi permite codului inclusiv să se modifice singur (dacă mediul de stocare al programului este accesibil pentru scriere), ceea ce poate permite o formă puternică de recursivitate. Până în acel moment, practic toate computerele, inclusiv Colossus-ul lui Turing, fuseseră construite pentru o sarcină specifică. Programul stocat îi permite computerului să fie cu adevărat universal, împlinind în acest fel viziunea lui Turing referitoare la universalitatea calculului.
Alt concept-cheie al lui von Neumann se referă la includerea în fiecare instrucțiune a unui cod de operare care specifică operațiunea aritmetică ori logică ce trebuie efectuată, precum și adresa unui operand din cadrul memoriei. Formularea lui von Neumann a fost introdusă odată cu publicarea proiectului pentru modelul EDVAC, un proiect condus împreună cu colaboratorii J. Presper Eckert și John Mauchly. EDVAC n-a funcționat decât începând cu 1951, între timp apărând alte computere cu program

* *Random access memory* (engl.), cunoscută sub acronimul RAM.

(TV. *trad.)*

stocat, precum Manchester Small-Scale Experimental Machine, ENIAC, EDSAC si BINAC, toate influențate decisiv de studiul lui von Neumann și implicându-i pe Eckert și Mauchly ca proiectanți. Von Neumann a contribuit direct la proiectarea multora dintre aceste dispozitive, inclusiv o versiune mai nouă a ENIAC, ce suporta un program stocat.

Au existat câțiva precursori ai arhitecturii concepute de von Neumann, deși niciunul dintre ei nu a fost cu adevărat mașina von Neumann, cu o excepție surprinzătoare. Mark I al lui Howard Aiken, construit în 1944, avea un element de programabilitate, dar nu folosea un program stocat. Citea instrucțiunile de pe o bandă de hârtie perforată și apoi executa imediat fiecare comandă. Nu exista nicio instrucțiune de salt condiționat[4], așadar nu poate fi considerat un exemplu de arhitectură de tip von Neumann.

înainte de Mark I, în 1941 a apărut computerul Z-3, al lui Konrad Zuse. Și acesta își citea programul de pe o bandă (în acest caz, codificat pe peliculă de film) și de asemenea îi lipsea instrucțiunea de salt condiționat. Ca fapt divers, Zuse a fost sprijinit de

4 O instrucțiune de salt condiționat *(conditional branch instruction)* îi permite computerului să comute între fluxuri diferite de instrucțiuni pe baza evaluării unei condiții, folosind datele disponibile de la momentul execuției. *(N trad.)*

institutul german de cercetări în domeniul aviației, care a folosit Z-3 ca să studieze trepidațiile aripilor, dar propunerea înaintată guvernului nazist de a i se schimba releele cu tuburi cu vacuum i-a fost respinsă. Pentru naziști, computerele „nu erau importante pentru război".

Unicul precursor adevărat al conceptului lui von Neumann apăruse cu un întreg secol mai devreme. Dispozitivul analitic[5] al lui Charles Babbage, pe care acesta îl descrisese în 1837, includea ideea unui program stocat, livrat cu ajutorul unor cartele perforate luate dintr-un război de țesut Jacquard. RAM-ul său includea o mie de cuvinte de 50 de zecimale fiecare (echivalentul a aproximativ 21 de *kilobytes}.* Fiecare instrucțiune includea un cod de operare și un număr operand, exact ca în cazul coduri- lor-masină moderne. Includea totodată un salt conditi- > > onat și procesare în buclă, așa că poate fi considerat un adevărat dispozitiv de tip von Neumann. Se pare că dispozitivul analitic depășea posibilitățile tehnice și organizational ale lui Babbage, astfel încât n-a mers niciodată. Nu e clar dacă pionierii din domeniul computerului din secolul al XX-Iea, inclusiv von Neumann, cunoșteau cer- cetările lui Babbage.

Chiar dacă n-a mers niciodată, calculatorul lui Babbage a dus la crearea domeniului programării software. Ada Byron, contesă de Lovelace și singurul copil legitim al poetului Byron, a creat

5 *Analytical Engine* (engl.). (AC *trad.)*

programe pentru dispozitivul analitic al lui Babbage pe care le verifica de erori în propria minte, o practică bine-cunoscută programatorilor de astăzi sub denumirea de *table checking.* A tradus un articol al matematicianului italian Luigi Menabrea referitor la dispozitivul analitic și l-a adnotat în amănunțime. Printre altele, scria că „dispozitivul analitic țese modele algebrice, așa cum războiul de țesut Jacquard țese flori și frunze". A lansat probabil primele speculații despre posibilitatea de a crea inteligență artificială, dar a conchis că dispozitivul analitic nu are „nicio pretenție de a da naștere vreunui lucru".

Concepția lui Babbage e pur și simplu uluitoare dacă avem în vedere perioada în care a trăit și lucrat acesta. Totuși, până la mijlocul secolului al XX-lea, munca lui a rămas pierdută în negura vremurilor. Von Neumann a fost cel care a conceptualizat și articulat principiile-cheie ale computerului așa cum îl cunoaștem azi, iar lumea îi recunoaște acest merit continuând să se refere la dispozitivul lui von Neumann ca la principalul model de calcul computațional.

Este de reținut faptul că dispozitivul lui von Neumann comunică continuu date între diversele sale unități, precum și în interiorul acestora, astfel încât n-ar putea fi construit fără teoremele lui Shannon si metodele sale de transmitere și stocare a informației digitale sigure.

Iar cu aceasta ajungem la cea de-a patra idee importantă, aceea de a găsi căi pentru a înzestra computerele cu inteligență, ca să mergem dincolo de concluzia Adei Byron conform căreia un computer nu poate gândi creativ. Alan Turing introdusese deja acest obiectiv în studiul său din 1950, intitulat „Computing Machinery and Intelligence", care include faimosul său „test Turing", care certifică dacă o IA a ajuns la nivelul de inteligență al omului. In cartea de față, după prezentarea arhitecturii de tip von Neumann, autorul investighează însuși creierul uman. In definitiv, acesta este cel mai bun exemplu de sistem inteligent. Dacă îi putem învăța metodele, putem folosi aceste paradigme inspirate de biologie pentru a construi dispozitive și mai inteligente. Acest volum este cea mai timpurie examinare serioasă a creierului omenesc din perspectiva unui matematician și pionier din domeniul computerelor. Până la von Neumann, domeniul informaticii si cel al neurostiin- țelor erau două insule fără nicio punte între ele.

Este ironic faptul că ultima lucrare a unuia dintre cei mai străluciri matematicieni ai secolului al XX-lea si dintre » > pionierii erei computerului era o examinare a inteligenței în sine. Lucrarea a fost concepută ca o serie de prelegeri pentru Universitatea Yale, pe care, din cauza ravagiilor cauzate de cancer, von Neumann nu le-a mai tinut, iar manuscrisul care ar fi stat la baza lor n-a mai

fost terminat. Chiar și așa, ea rămâne prefigurarea genială și profetică a ceea ce eu consider a fi cel mai important și mai îndrăzneț proiect al omenirii. Von Neumann începe prin a articula diferențele și asemănările dintre computer și creierul omenesc. Având în vedere că manuscrisul a fost redactat între 1955 și 1956, conținutul său e remarcabil de exact, în special în ce privește detaliile care se pretează la comparații. Autorul notează că semnalul de ieșire al neuronilor este digital: un axon transmite sau nu impulsul electric. Lucrul acesta era departe de a fi fost evident la acea vreme, în sensul că acest semnal de ieșire ar fi putut la fel de bine să fie analogic. Totuși, procesarea din interiorul dendritelor ce duc la un neuron, precum și cea din corpul celular al acestuia (soma) sunt analogice. El descrie aceste calculări ca pe o sumă ponderată de date de intrare cu un prag. Acest model al felului în care lucrează neuronii a condus la dezvoltarea domeniului *conecționismului*[6], în care sistemele sunt construite pornind de la acest model neuronal atât în cazul hardware-ului, cât și al software-ului. Primul astfel de sistem *conectionist* a fost creat de Frank Rosenblatt ca program de software pe un computer IBM 704, la Corneli, în 1957.

Astăzi, avem modele mai sofisticate care explică

6 *Connectionism* (engl.), domeniu care încearcă să explice fenomenele mintale cu ajutorul rețelelor neurale artificiale. (A *trad.)*

felul în care neuronii combină semnalele de intrare, dar ideea esențială a procesării analogice a intrărilor dendritei folosind concentrații de neurotransmitători a rezistat în > >
timp. Nu ne-am fi așteptat ca von Neumann, în 1956, să aibă o cunoaștere atât de exactă a tuturor acestor detalii despre felul în care neuronii procesează informația, dar punctele-cheie pe care își bazează argumentele sunt în continuare valabile.
Von Neumann aplică ideea de universalitate a calculului pentru a conchide următoarele: chiar dacă arhitectura creierului și cea a computerului par a fi radical diferite, putem să afirmăm că un dispozitiv von Neumann poate simula procesarea efectuată de un creier. Insă reciproca nu poate fi susținută, deoarece creierul nu este un dispozitiv von Neumann și ca atare nu are un program stocat. Algoritmii săi (metodele sale) sunt impliciți în structura sa.
Von Neumann trage în mod corect concluzia că neuronii pot învăța diverse tipare pornind de la semnalele lor de intrare, despre care știm astăzi că sunt codificate în concentrațiile de neurotransmițători. Ce nu se cunoștea pe vremea lui von Neumann este că si învățarea are loc tot prin crearea și distrugerea de legături între neuroni.
Von Neumann notează că viteza procesării neurale este extrem de lentă, de ordinul a o sută de calcule pe secundă, însă creierul compensează printr-o procesare paralelă masivă. Fiecare dintre cei 10^{10}

neuroni procesează simultan (un număr de asemenea destul de exact; astăzi, numărul e estimat undeva între IO^{10} și IO^{11})- De fapt, fiecare dintre legături (cu o medie de IO^{3} legături per neuron) calculează simultan.

Estimările sale și descrierea făcută procesării neurale sunt remarcabile, mai ales dacă ne gândim Ia situația primitivă în care se aflau neurostiintele la acea vreme. Totuși, nu sunt de acord cu una dintre concepțiile sale privitoare la capacitatea de memorare. Creierul, presupune von Neumann, își amintește fiecare semnal de intrare pe tot parcursul vieții. Șaizeci de ani înseamnă în jur de 2 x IO^9 secunde. Având în vedere că fiecare neuron primește aproximativ 14 semnale de intrare pe secundă (ceea ce, de fapt, este mai puțin cu cel puțin trei ordine de mărime) și existenta a IO^{10} neuroni, von Neumann face o estimare de aproximativ 10^{20} de biți pentru capacitatea de memorare a creierului. In realitate, ne amintim doar o foarte mică parte dintre gândurile și experiențele noastre, iar aceste amintiri nu sunt stocate ca tipare sub formă de biți la un nivel inferior (ca o imagine video, de exemplu), ci mai degrabă ca secvențe de modele de nivel înalt. Cortexul nostru e organizat ca o ierarhie de entități capabile să recunoască modele. Unele dintre aceste entități vor recunoaște > > anumite forme topologice, precum liniuța din mijlocul literei A sau concavitatea de sub ea. Aceste entități de > recunoaștere de nivel inferior din neocortex trimit aceste >
recunoașteri la entități de la un nivel mai înalt. La urmă- > >
torul nivel, entitățile respective recunosc anumite litere ca fiind litera A. La un nivel și mai înalt, pot fi

recunoscute cuvinte, precum cuvântul „aparat“. Intr-o altă porțiune a cortexului, o entitate ar putea recunoaște obiectul, aparatul propriu-zis. Iar într-o altă zonă, alte entități de recunoaștere ar putea identifica cuvântul vorbit, „aparat“. La un nivel conceptual și mai înalt, o entitate ar putea concluzia: „A fost distractiv/[4] Amintirea evenimentelor și a gândurilor este codificată în termenii acestor recunoașteri de nivel superior. Dacă ne amintim o experiență, aceasta nu este echivalentă cu rularea unui videoclip în mintea noastră. Mai degrabă, ne amintim secvențe de modele de la nivelurile înalte. Practic, trebuie să ne reimaginăm experiența respectivă, fiindcă detaliile nu se rețin în mod explicit.

Te poți convinge singur de asta încercând să-ți amintești o experiență recentă - de exemplu, ultima dată când ai ieșit la plimbare. Cât din acea experiență îți amintești? Care a fost a cincea persoană pe care ai întâlnit-o? Ai văzut vreun cărucior pentru bebeluși? O cutie poștală? Ce ai văzut după primul colț? Dacă ai trecut pe lângă niște magazine, ce se afla în a doua vitrină? Poate că vei putea să reconstruiești răspunsurile la aceste întrebări pornind de la cele câteva indicii pe care ți le amintești, dar majoritatea dintre noi nu ne amintim perfect ce am trăit. Mașinile, pe de altă parte, pot s-o facă foarte ușor, iar acesta e unul dintre avantajele inteligenței artificiale.

Consider că puține dintre lucrurile din această carte sunt într-un dezacord semnificativ față de

ceea ce știm în > >
momentul de față. Nici azi nu suntem capabili să descriem perfect creierul, așadar n-ar trebui să ne așteptăm să o facă o carte scrisă în 1956 despre realizarea ingineriei inverse a creierului. Acestea fiind spuse, putem considera prezentarea lui von Neumann ca fiind remarcabil de actuală, iar detaliile pe care își bazează concluziile rămân valide. Pe măsură ce descrie fiecare mecanism din creier, el arată felul în care un computer modern ar putea să efectueze aceeași operațiune, în ciuda aparentelor diferențe. Mecanismele analogice ale creierului pot fi simulate prin cele digitale, deoarece calculul digital poate emula valori analogice la orice grad de precizie dorit (iar precizia informației analogice din creier e destul de scăzută).
Paralelismul masiv al creierului poate fi și el simulat, având în vedere importantul avantaj al computerelor în ceea ce privește viteza de calcul în serie (un avantaj ce a crescut considerabil de când a fost scrisă cartea). In plus, putem folosi și procesarea paralelă computerizată, utilizând dispozitive von Neumann în paralel. Este exact modul în care funcționează supercalculatoarele azi.
Având în vedere cât de rapid putem lua decizii și cât de încet calculează neuronii, el conchide că metodele creierului nu pot implica algoritmi secvențiali foarte extinși. La un meci de baseball, când un jucător de la baza a treia se hotărăște să

arunce mingea în baza întâi, și nu în a doua, el ia hotărârea asta într-o fracțiune de secundă. Există timp pentru ca fiecare neuron să treacă doar prin câteva cicluri (timpul necesar pentru circuitele neuronale să analizeze noile semnale de intrare). Von Neumann conchide în mod corect că remarcabilele puteri ale creierului provin de la cei zece miliarde de neuroni capabili să proceseze informația în același timp. Noi descoperiri din domeniul ingineriei inverse a cortexului vizual au confirmat faptul că emitem judecăți vizuale sofisticate în doar trei sau patru cicluri neuronale.
Creierul are o capacitate considerabilă de a se lăsa modelat, ceea ce ne face capabili să învățăm. Insă în cazul computerului, capacitatea asta e cu mult mai mare, deoarece acesta își poate restructura complet metodele prin schimbarea software-ului. Astfel, computerul va putea imita creierul, însă invers nu va fi posibil.
Când von Neumann a comparat impresionanta capacitate de organizare în paralel a creierului cu (cele câteva) computerele din vremea lui, în mod evident, creierul avea o capacitate mult mai mare decât cea a computerelor din 1956. Astăzi se construiesc primele supercalculatoare care ating o viteză egală cu cele mai conservatoare estimări ale vitezei necesare pentru a simula funcțional creierul uman (aproximativ IO^{16} operațiuni pe secundă). Estimez că hardware-ul pentru acest nivel de calcul va costa în jur de 1 000 de dolari la începutul anilor

2020[7]. Deși lucrarea de față a fost scrisă foarte timpuriu în istoria computerelor, von Neumann considera că în cele din urmă atât hardware-ul, cât și software-ul inteligenței umane vor fi disponibile. Acesta este motivul pentru care a pregătit aceste prelegeri.

Von Neumann era conștient de ritmul accelerat al progresului și de implicațiile profunde ale acestuia pentru viitorul omenirii, astfel că ajungem la cea de-a cincea idee-cheie a erei informației. La un an după moartea lui von Neumann (survenită în 1957), un coleg matematician, Stan Ulam, îl cita: „Progresul accelerat al tehnologiei și schimbările din modul de viață al omului ne fac să credem că, în curând, în istoria rasei umane va apărea o anumită *singularitate* esențială, dincolo de care viața oamenilor, așa cum o știm acum, nu va putea continua/[4] Aceasta a fost, din câte știm, prima utilizare a termenului de „singularitate[448] în contextul istoriei omenești.

RAY KURZWEIL

Traducere din engleză de
Ludovic-Ștefan Skultéty

7 Ediția a treia a cărții, pentru care Ray Kurzweil semnează această prefață, a apărut în original în 2012. *(N. red.)*

8 Mai precis, e vorba despre conceptul de „singularitate tehnologică", acea ipoteză conform căreia existența inteligenței artificiale ar putea avea drept consecințe schimbări imprevizibile asupra omenirii. *(N. trad.)*

Bibliografie suplimentarâ

Bochner, S., *A Biographical Memoir of John von Neumann,* National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1958.

Turing, A.M., „Computing Machinery and Intelligence", *Mind,* vol. 59, nr. 236, octombrie 1950, pp. 433-460.

Turing, A.M., „On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society,* vol. 42, 1936, pp. 230-265. doi:10.1112/ plms/s2-42.1.230.

Turing, A.M., „On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem: A Correction", *Proceedings of the London Mathematical Society,* vol. 43, 1938, pp. 544-546. doi:10.1112/plms/s2-43.6.544.

Ulam, S., „Tribute to John von Neumann", *Bulletin of the American Mathematical Society,* vol. 64, nr. 3, partea a Il-a, mai 1958, pp. 1-49.

von Neumann, John, „A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal,* vol. 27, iulie și octombrie 1948.

von Neumann, John, „First Draft of a Report on the EDVAC", Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, 30 iunie 1945.

Cuvânt înainte la ediția a doua[9]

Această carte aparent inocentă se află în centrul unui adevărat uragan. Ea reprezintă un teritoriu al clarității și al calmului în mijlocul unui vast vârtej de argumente puternice și de programe de cercetare concurente. Iar ceea ce o face și mai deosebită este faptul că a fost scrisă în 1956, chiar la începutul exploziei din domeniul tehnologiei computerelor electronice, explozie care va rămâne pentru totdeauna un element definitoriu al celei de-a doua jumătăți a secolului al XX-lea. Ceea ce a încercat să ofere John von Neumann în seria sa finală de prelegeri - publicate sub forma acestei cărți - a fost o evaluare echilibrată a posibilelor activități de calcul din creier, văzute prin prisma teoriei de calcul moderne și în lumina tehnologiei computerelor și a neuroștiințelor empirice care existau la data respectivă.

Ar fi de așteptat ca o asemenea evaluare, făcută în acea perioadă, să fie acum cu totul depășită. De fapt, adevărul stă la celălalt pol. In ceea ce privește teoria de calcul pură (teoria generării elementelor oricărei fiincții calculabile),fundamentele puse de William Church, Alan Turing și, într-o anumită măsură, de către însuși von Neumann s-au dovedit a fi atât de solide și de fertile pe cât ar fi putut spera oricare dintre ei. Acea lentilă a fost așezată corect de la bun început și încă oferă o focalizare clară asupra unei vaste arii de probleme.
In ceea ce privește tehnologia computerelor, dispozitivele care au schimbat mileniul și care se găsesc acum în toate birourile și în jumătate dintre casele americane sunt toate reprezentări ale așa-numitei „arhitecturi von Neumann". Toate constituie exemple ale unei organizări funcționale dezvoltate și explorate inițial de către von Neumann - organizare care utilizează un „program" secvențial, reținut în „memoria" modificabilă a dispozitivului pentru a dicta natura și ordinea pașilor de calcul de bază realizați de „procesorul central" al dispozitivului. Motivele inițiale ale acestei organizări sunt explicate aici pe scurt și extrem de clar, în cuvintele lui von Neumann, deși acolo unde noi vorbim acum despre „programe" el vorbește despre „coduri", iar acolo unde vorbim despre „programe în cod-mașină" *versus* „limbaje de programare de nivel înalt", von Neumann vorbește despre „coduri complete" *versus* „coduri

scurte". Dar numai denumirile și frecvențele de lucru ale procesoarelor calculatoarelor s-au schimbat. John von Neumann ar recunoaște orice calculator utilizat la ora actuală - de la organizatoarele PalmPilot la supercalculatoare, indiferent dacă rulează pe ele jocuri de poker sau simulări ale genezei galactice - drept încă o implementare a viziunii sale arhitecturale inițiale. El nu a fost lăsat în urmă, din niciun punct de vedere relevant, de numeroasele evoluții din domeniul tehnologiei IT.
In ceea ce privește neuroștiințele empirice, situația este chiar mai complicată, dar cu atât mai interesantă. Pentru început, toate domeniile neuroștiințelor (neuroanatomia, neurofiziologia, neurobiologia dezvoltării embrionare și neurobiologia cognitivă) au evoluat în mod spectaculos. Și aici, cercetările minuțioase de o jumătate de secol au creat o stiintă substantial nouă. Datorită numeroaselor
> > >
tehnici experimentale recente (cum ar fi microscopia electronică si confocală, studierea curentilor ionici celulari, electro- și magneto-encefalografia, scanările tomografice, scanările cu rezonanță magnetică și scanările tomografice cu emisie de pozitroni), acum avem o imagine mult mai clară a microstructurii filamentelor din creier, a comportamentului electrochimie al părților sale microscopice și a activității lui globale pe perioada

diverselor forme de funcționare conștientă. Deși încă ascunde multe mistere, creierul nu mai reprezintă „cutia neagră“ care era cândva.

In mod curios, totuși, aceste două stiinte înrudite — una axată asupra proceselor cognitive *artificiale,* iar cealaltă asupra proceselor cognitive *naturale* - și-au urmărit preocupările în paralel, într-o separare totală una față de cealaltă, din perioada anilor 1950 și până în prezent. Oamenii care obțineau calificări avansate în domeniul IT > învățau, de regulă, prea puține lucruri sau (cel mai adesea) nimic în ceea ce privește creierul biologic, iar activitățile

lor de cercetare au fost concentrate, în general, asupra creării de programe, dezvoltării de noi limbaje de programare sau dezvoltării și producerii de microprocesoare din ce în ce mai bune, niciuna dintre aceste activități nea- ducându-i în contact cu neuroștiințele empirice. In aceeași măsură, oamenii care au obtinut calificări avansate în

domeniul heuroștiințelor au învățat, de regulă, prea puțin sau chiar nimic despre teoria matematică, teoria mașinilor de calcul, logica formală, aritmetica binară ori electronica tranzistorilor. Mai degrabă, și-au petrecut timpul dedicat cercetării colorând bucăți de țesut cerebral pentru examinare microscopică sau introducând microelectrozi în neuroni vii pentru a înregistra comportamentul lor electric în timpul diverselor activități cognitive. Dacă au utilizat un computer și au învățat un limbaj de programare - așa cum au procedat mulți -, au

facut-o numai pentru a-și direcționa și centraliza activitățile experimentale, la fel ca folosirea unui voltmetru, a unui calculator de buzunar sau a unei cartoteci.
După câte se pare acum, adevărul este că, deși fiecare dintre aceste două științe mai are mult de învățat despre propriul domeniu și ambele au înregistrat o evoluție cu adevărat spectaculoasă, ele nu s-au sprijinit și descoperit reciproc. In ciuda presupusei lor suprapuneri - în fond, împărtășeau aceleași preocupări referitoare la procesele cognitive și la cele de calcul —, au mers pe două căi paralele și fiecare a realizat progrese remarcabile, însă preluând prea puțin sau chiar deloc din știința-soră. Dar de ce?
Un răspuns care se repetă cu insistență este acela că creierul biologic are o organizare fizică și folosește o strategie de calcul extrem de diferită de arhitectura von Neumann utilizată la calculatoarele standard. Timp de aproape 50 de ani, cele două științe-surori s-au concentrat practic asupra unor probleme extrem de diferite. Privind în urmă, nu este de mirare că s-au dezvoltat cu totul independent una de cealaltă.
Acest răspuns este încă extrem de disputat și ar putea fi, într-adevăr, greșit. Dar se află în centrul actualelor discuții legate de modul în care creierul *biologic* realizează numeroasele lui miracole cognitive și de felul cum ar trebui să urmărim obiectivul, încă vital, de a construi forme diferite de

inteligență *artificială.* Oare ar fi necesar să trecem pur și simplu peste limitările evidente ale sistemelor biologice (limitări legate mai ales de viteză și de acuratețe) și să ne concentrăm asupra uimitorului potențial al sistemelor electronice, sisteme care pot - în principiu și chiar cu o arhitectură von Neumann - să pună în aplicare sau să simuleze *orice* activitate de calcul posibilă? Sau, indiferent din ce motiv, ar trebui mai bine să încercăm să imităm organizarea activităților de calcul ce pot fi observate la nivelul creierilor insectelor, peștilor, păsărilor ori mamiferelor? Și, oricum, în ce constă această organizare? Este ea fundamental diferită de ceea ce se petrece la nivelul mașinilor artificiale?

Aici, cititorul ar fi uimit să descopere că John von Neumann contribuie cu un răspuns puternic, premonitoriu și, în mod clar, nonclasic. în prima parte a cărții el își conduce cititorul, pas cu pas, prin lumea conceptelor clasice pentru care este atât de faimos, iar în final, când ajunge Ia discuția despre creier, se încumetă să tragă o primă concluzie, anume că „funcționarea acestuia este *prima facie*[9] digitală". Dar această abordare inițială a informației neuronale este, de asemenea, la prima vedere procustiană, fapt pe care von Neumann îl aduce imediat în discuție, pentru ca apoi să înceapă să îl studieze în amănunt.

9 Expresie din limba latină care înseamnă „la prima vedere“ („asa cum apar lucrurile"). *(N. red.)*

Prima problemă pe care o remarcă el este faptul că legăturile dintre neuroni nu au configurația „două linii intră, o linie iese", care se observă Ia clasicele porți logice „și" sau „ori". Deși fiecare celulă se prelungește cu exact un singur axon, cum ar cere abordarea clasică, ea *primește* mai mult de 100, ba chiar mai mult de câteva mii de semnale de ieșire de Ia numeroși alți neuroni. Acest fapt nu are o importanță decisivă - există, de exemplu, sisteme logice multivalente -, însă îi dă autorului de gândit.
Conflictul se adâncește pe măsură ce von Neumann compară punct cu punct dimensiunile fundamentale ale „componentelor active de bază" ale creierului (neuronii, după cum se presupune) cu „componentele active de bază" ale calculatorului (diversele porți logice). Din punct de vedere spațial, el remarcă faptul că neuronii au avantajul de a fi de cel puțin 100 de ori mai mici decât corespondenții lor electronici. (Pe atunci, această estimare era perfect corectă, dar odată cu apariția neprevăzută a microprocesoarelor fotogravate, acest avantaj de mărime pur și simplu a dispărut, cel puțin atunci când vine vorba despre suprafețe bidimensionale. Putem să îi iertăm asta lui von Neumann.)
Mai important, neuronii au un dezavantaj major în ceea ce privește viteza operațiilor pe care Ie realizează. După cum estimează von Neumannn, ei sunt poate de IO^5 ori mai lenti decât tuburile cu vid sau tranzistorii în ceea ce privește timpul necesar

pentru a realiza o operație logică de bază. Aici are extrem de multă dreptate, în moduri ce urmează să fie revelate. In realitate, el chiar subestimează dezavantajul considerabil al neuronilor. Dacă presupunem că neuronii ar avea o „frecvență de lucru“ (similară frecvenței ceasului intern al unui microprocesor) de cel mult 100 Hz, atunci frecvența de lucru de aproape 1 000 MHz (asta ar însemna 10^9 operații pe secundă) pe care o au cele mai noi generații de calculatoare de birou face ca dezavantajul neuronilor să ajungă la un factor de aproape IO^7. Concluzia este inevitabilă. In cazul în care creierul ar fi un calculator digital cu arhitectură von Neumann, atunci el s-ar comporta ca o broască-țestoasă în materie de calcul, dacă ar fi să facem o comparație.

In plus, precizia cu care creierul biologic poate reprezenta orice variabilă este, de asemenea, cu multe ordine de mărime sub gradul de precizie pe care îl oferă un calculator digital. După cum observă von Neumann, calculatoarele pot manipula cu ușurință valori având opt, zece sau două-sprezece zecimale, pe când presupusul mod de reprezentare al neuronului - frecvența șirului de impulsuri trimise de-a lungul axonului - pare a fi limitat Ia o precizie de maximum două zecimale (mai exact, plus sau minus un procent dintr-o frecvență maximă de circa 100 Hz). Acest lucru este îngrijorător deoarece, de regulă, pe parcursul oricărui calcul care implică foarte mulți pași, micile

erori de reprezentare din pașii de început se acumulează, trans- formându-se în erori mai mari la pașii de final. Mai rău, spune Neumann, pentru multe clase importante de calcul chiar și erorile infime din cadrul pașilor de început sunt *amplificate* exponențial în pașii ulteriori, fapt care duce, inevitabil, la rezultate finale extrem de imprecise. Astfel, în cazul în care creierul ar fi un calculator digital cu numai două zecimale, el ar fi extrem de prost la socotit.

împreună, aceste două limitări severe - una legată de viteză, alta de precizie - îl conduc pe von Neumann la concluzia că, oricare ar fi modul de calcul pe care îl folosește creierul, acesta trebuie să implice ceea ce el numește o „adâncime logică“ minimă. Aceasta ar însemna că, orice ar face, creierul nu poate realiza secvențe de mii și mii de pași de calcul organizați secvențial, cum se întâmplă în cazul activității recursive și extrem de rapide a procesorului central al unui calculator digital. Dată fiind lentoa- rea activității lui neuronale, creierul nu are suficient timp pentru a termina vreun calcul, în afară de cele mai simple. Și, dată fiind precizia scăzută a modului de reprezentare care îi este caracteristic, el ar fi incompetent în ceea ce privește calculele chiar și dacă ar avea timp suficient.

Aceasta e o concluzie tulburătoare pentru von Neumann, deoarece devine evident faptul că, în ciuda limitărilor menționare anterior, creierul

reușește cumva să realizeze o mare varietate de calcule sofisticate, ba mai mult, face asta cât ai clipi. Dar argumentele lui von Neumann sunt perfect corecte. Limitările pe care le scoate el în evidență sunt cu totul si cu totul reale. Si atunci, cum ar trebui să înțelegem creierul?

După cum corect observă von Neumann, sistemul de calcul al creierului pare să compenseze lipsa inevitabilă de profunzime logică prin exploatarea unei extraordinare extensii pe „lățime“. Autorul afirmă: , Au tomatele naturale mari și eficiente funcționează aproape sigur în sistem *paralel,* pe când automatele artificiale mari și eficiente au mai degrabă tendința de a fi aranjate *în serie“* (sublinierea este a lui). Prima va tinde să aleagă cât mai multe elemente logice (sau informaționale) posibil în mod *simultan* și să le proceseze *simultan* (sublinierea este a noastră). Acest lucru înseamnă că trebuie să mergem dincolo de neuroni, adaugă von Neumann, pentru a include toate *sinapsele* la numărul „componentelor active de bază“ ale creierului.

Toate acestea sunt toate aprofundări importante. După cum știm acum, creierul conține circa IO[14] conexiuni sinaptice, toate modulând semnalul axonal înainte de a-1 transmite neuronului primitor. Apoi, sarcina unui neuron este să adune sau, altfel spus, să integreze semnalele de intrare de la aceste conexiuni sinaptice (care pot fi chiar și 10000 într-o singură celulă) și să genereze, la rândul său,

propriul semnal de ieșire axonal. Cel mai important este faptul că aceste mici acțiuni modulatorii au loc simultan. Astfel, cu fiecare sinapsă care este activă de 100 de ori pe secundă (să ne amintim că frecvențele tipice de vârf sunt de aproximativ 100 Hz), numărul total de acțiuni elementare de procesare a informațiilor realizate de către creier trebuie să fie de aproximativ IO^{2} înmulțit cu IO^{14}, sau IO^{16} operații pe secundă! Este o realizare uimitoare pentru orice sistem, iar comparația cu numărul anterior, de IO^{9} operații de bază pe secundă pentru un calculator de birou de ultimă generație, este în mod clar favorabilă sistemului nervos uman. Până la urmă, creierul nu este nici țestoasă, și nici un nătâng, pentru că nu a fost niciodată un sistem digital serial, ci unul analogic, organizat în mare măsură în sistem paralel.
Asta sugerează aici von Neumann, iar neuroștiințele moderne și modelarea computerizată a rețelelor paralele tind să confirme cu tărie acest lucru. Strategia alternativă de calcul pe care a presupus-o von Neumann pare să fie acum un exemplu de *multiplicare* simultană a fiecăreia dintre miile sau milioanele de frecvente axonale de vârf >
(care constituie un *vector de intrare* extrem de mare) cu coeficienții unei matrice încă și mai mari (mai exact, configurația numeroaselor milioane de conexiuni sinaptice care leagă o populație neuronală de următoarea), pentru a genera un *vector de ieșire* (mai exact, un model nou și diferit

de frecvențe de vârf simultane de-a lungul populației de neuroni receptoare). Această configurație globală nou dobândită a acelor multe milioane, de fapt miliarde, de conexiuni sinaptice întruchipează informația și abilitățile pe care le-a obținut creierul. Și tot aceste conexiuni sinaptice sunt cele care realizează atât de rapid transformările de calcul asupra oricăror semnale de intrare axonale - de exemplu, cele provenite de la simțuri - sosite la pragul lor comun. Acest lucru are drept rezultat atât viteza, cât și lipsa de erori amplificate recursiv, fapt considerat esențial de către von Neumann.

Totuși, trebuie spus cât mai repede că acest punct de vedere decisiv nu diminuează cu nimic integritatea tehnologiilor digitale și seriale și nici speranțele noastre de a crea inteligență artificială. Dimpotrivă. Putem realiza versiuni electronice ale conexiunilor sinaptice și, evitând clasica arhitectură von Neumann, putem crea vaste rețele paralele de neuroni artificiali, obținând astfel versiunea electronică a regimului de calcul „de mică adâncime", dar „extrem de mare întindere" care este, în mod clar, folosit de către creier. Acestea vor avea în plus uimitoarea proprietate de a fi de aproximativ IO^6 ori mai rapide decât corespondenții lor biologici, pur și simplu pentru că ar deține componente electronice în locul celor biochimice. Asta înseamnă multe lucruri. întâi, un duplicat *electronic* de tipul sinapsă-că- tre-sinapsă

al creierului nostru biologic ar putea beneficia, în decursul a doar 30 de secunde, de un șir de gânduri care ar necesita un an dacă ar trece prin componentele din craniul nostru. Și același dispozitiv ar putea beneficia, într-o jumătate de oră, de o viață intelectuală care ar consuma întreaga noastră existență de circa 70 de ani, dacă ar trece prin propriul nostru creier. Este limpede că inteligența are un viitor extrem de interesant. Trebuie să adăugăm aici un dram de prudență. Este adevărat că au fost deja construite mici rețelele neuronale artificiale pornind de la presupunerea că sinapsele sunt multiplicatori minusculi, că neuronii sunt mici însumă- tori cu o funcție de ieșire sigmoidă și că informațiile sunt codificate numai în frecvența impulsului neuronal. Și este adevărat că multe dintre aceste rețele manifestă talente „cognitive'[4] remarcabile, cel puțin după un antrenament de durată. Dar aceleași modele de rețea, chiar dacă sunt analogice și în mare măsură paralele, manifestă prea puțin din subtilitatea și varietatea comportamentului sinapselor reale și al neuronilor reali. Descoperirile din domeniul neurostiintific continuă să ne dezvăluie, la fel cum i-au arătat și lui von Neumann, că primele noastre modele ale activității cerebrale sunt, în cel mai bun caz, niște aproximări grosiere ale realității calculului neuronal și s-ar putea dovedi la fel de greșite ca presupunerea istorică — combătută aici de von Neumann - că functionarea creierului

>
este în primul rând digitală. Există mai multe modalități de codificare a informațiilor în comportamentul unui axon, mai multe modalități de a le modula la nivelul unei sinapse și mai multe modalități de a le integra la nivelul unui neuron. Modelele noastre actuale funcționează suficient de bine pentru a ne captiva imaginația, dar creierul încă adăpostește multe enigme și anunță mari surprize în viitor. Sarcina noastră, în acest domeniu, este departe de a se fi încheiat, iar noi trebuie să fim la fel de smeriți în fața realității empirice precum a fost în mod evident și von Neumann.

Autorul acestei cărți poartă răspunderea pentru arhitectura de calcul pe care se bazează aproape întreaga „revoluție a calculatoarelor" din secolul al XX-lea. Pe termen lung, această revoluție va avea un impact asupra viitorului omenirii cel puțin la fel de mare ca mecanica lui Isaac Newton sau electromagnetismul lui James Maxwell. Mai mult, în ceea ce privește creierul biologic, von Neumann a avut puterea și capacitatea de a vedea dincolo de propria sa arhitectură de calcul, întrezărind profilul unei noi paradigme explicative pentru o putere probabil și mai mare.

La finalul unor discuții ample pe tema naturii inteligenței, adeseori poate fi auzit câte un comentator care susține, plin de speranță, că la un moment dat va apărea cineva care va juca rolul

unui „Newton al minții". Noi dorim să încheiem într-o notă diferită. Așa cum sugerează comentariul precedent și după cum ilustrează cartea care urmează, există dovezi destul de solide că acel Newton mult așteptat a apărut deja și, din păcate, a și dispărut. Numele lui este John von Neumann.

Prefață

PAUL si PATRICIA CHURCHLAND

Oamenii de știință din toată lumea sunt de părere că susținerea Prelegerilor Silliman, una dintre cele mai vechi și renumite serii de conferințe academice din Statele Unite, este un privilegiu și o onoare. în mod tradițional, celui care organizează aceste conferințe i se cere să planifice o serie de discuții, pe o perioadă de circa două săptămâni, iar apoi să structureze manuscrisul prelegerilor într-o carte care să fie publicată sub auspiciile Universității Yale, gazda și sediul central al Prelegerilor Silliman.

La începutul anului 1955, soțul meu, John von Neumann, a fost invitat de către Universitatea Yale să țină Prelegerile Silliman în primăvara anului 1956, pe la sfârșitul lui martie, începutul lui aprilie. Johnny s-a simțit extrem de onorat și bucuros de această invitație, în ciuda faptului că acceptarea trebuia să se facă sub rezerva unei condiții - și anume ca prelegerile să se limiteze la o singură săptămână. Totuși, manuscrisul care le însoțea ar fi acoperit într-un mod mai amplu subiectul ales de el - *Computerul și creierul -,* o temă de care era interesat de mult timp. Cererea pentru scurtarea duratei prelegerilor fusese făcută din necesitate, deoarece Johnny tocmai fusese numit de către președintele Eisenhower membru în Comisia pentru Energie Atomică - o slujbă cu normă întreagă, care nu-i permitea nici măcar unui om de știință să stea prea multă vreme departe de biroul de la Washington. Totuși, soțul meu știa că poate să-și facă timp pentru a scrie prelegerile, întrucât el întotdeauna scria acasă, noaptea sau dimineața devreme. Puterea lui de muncă era practic fără limite, mai ales dacă îl pasiona ceea ce facea, iar multiplele posibilități neexplorate din domeniul automatelor de calcul îl interesau cu adevărat; așa că era absolut convins că putea să pregătească un manuscris complet, chiar dacă durata conferințelor trebuia cumva scurtată. Universitatea Yale, plină de solicitudine și înțelegere atât în acea perioadă

timpurie, cât si mai târziu, când nu au mai fost decât tristete, sufe- rință și dor, a acceptat această propunere, iar Johnny și-a început noua muncă în cadrul Comisiei, cu stimulentul suplimentar că își va continua lucrul la teoria automatelor de calcul, chiar dacă aceasta se facea oarecum pe ascuns.
In primăvara anului 1955, ne-am mutat din Princeton în Washington, iar Johnny și-a luat concediu fără plată de la Institutul pentru Studii Avansate, unde fusese profesor în cadrul Școlii de Matematică începând din anul 1933.
Johnny s-a născut la Budapesta, în Ungaria, în 1903. încă din copilărie a dat dovadă de o capacitate remarcabilă și de interes pentru domeniul științific. Copil fiind, memoria lui aproape fotografică s-a manifestat în multe moduri neobiș- nuite. Ajuns la facultate, a studiat mai întâi chimia și apoi matematica la Universitatea din Berlin, la Universitatea Tehnică din Zürich și la Universitatea din Budapesta. în 1927, a devenit lector independent la Universitatea din Berlin, fiind probabil cea mai tânără persoană care a primit un astfel de titlu la vreuna dintre universitățile germane în ultimele câteva decenii. Mai apoi, Johnny a predat la Universitatea din Hamburg, iar în 1930 a trecut pentru prima dată Oceanul Atlantic, după ce acceptase invitația Universității Princeton de a deveni lector pentru un an. în 1931, a ajuns să facă parte din personalul Universității Princeton, astfel că s-a stabilit definitiv în Statele

Unite si a devenit cetățean al Lumii Noi.
în anii 1920-1930, interesele științifice ale lui Johnny au fost extrem de variate, mai ales în domenii teoretice. Lucrările publicate de el acopereau sfere ale teoriei cuantice, logicii matematice, teoriei haosului, geometriei continue și probleme legate de inele de operatori, precum și multe alte sectoare ale matematicii pure. Apoi, la sfârșitul anilor 1930, a devenit interesat de chestiuni legate de hidrodinamica teoretică, în special de marile dificultăți întâmpinate în obținerea de soluții la ecuații diferențiale parțiale cu ajutorul metodelor analitice cunoscute. Această muncă asiduă, continuată chiar si când norii războiului întunecau orizontul peste tot în lume, La adus în sectorul științific al apărării și l-a atras tot mai mult spre domeniile matematicii și fizicii aplicate. Interacțiunea undelor de șoc, o problemă hidrodinamică foarte complicată, a devenit unul dintre sectoarele de mare interes în cercetarea din domeniul apărării, iar cantitatea enormă de calcule necesare pentru a obține unele dintre răspunsuri l-a determinat pe Johnny să utilizeze un dispozitiv de calcul de mare putere în acest scop. ENIAC, construită în Philadelphia pentru Ballistic Research Laboratories of Army Ordnance, a reprezentat introducerea lui Johnny în lumea marilor posibilități de soluționare pentru multe probleme încă nerezolvate cu ajutorul automatizării. El a contribuit la modificarea unei părți din arhitectura

logi- co-matematică a dispozitivului ENIAC, iar de atunci și până în ultimele sale ore de viață a rămas interesat și uimit de aspectele încă neexplorate și de posibilitățile utilizării din ce în ce mai frecvente a acestor automate de calcul.
In 1943, la scurt timp după ce se dăduse startul Proiectului Manhattan, Johnny a devenit unul dintre oamenii de știință care au „dispărut în Vest“, făcând naveta între Washington, Los Alamos și multe alte locuri. Aceasta a fost perioada în care a devenit absolut convins și a încercat să îi convingă și pe alții, din domenii foarte diverse, că operațiunile numerice realizate cu ajutorul dispozitivelor electronice rapide de calcul vor facilita în mod substanțial găsirea soluțiilor la numeroase probleme științifice dificile, încă nerezolvate.
După război, împreună cu un mic grup de ingineri și matematicieni de renume, Johnny a construit la Institutul pentru Studii Avansate un calculator electronic experimental, cunoscut sub numele de JONIAC, care în cele din urmă a devenit modelul-pilot pentru dispozitive similare din toată țara. Unele dintre principiile de baza dezvoltate în cadrul proiectului JONIAC sunt folosite și astăzi în cadrul celor mai rapide și mai moderne calculatoare.
Pentru a crea dispozitivul, Johnny și colegii săi au încercat să imite unele dintre operațiunile cunoscute ale creierului. Acest aspect l-a determinat să studieze neurologia, să caute oameni

din domeniul neurologiei și psihiatriei, să aibă mai multe întâlniri la care a discutat astfel de subiecte și, în cele din urmă, să țină prelegeri în fața unor astfel de grupuri în legătură cu posibilitatea de a copia un model extrem de simplificat al creierului uman în dispozitivele de calcul create de om. In cadrul Prelegerilor Silliman, aceste idei urmau să fie extinse si dezvoltate.
>
In perioada postbelică, Johnny și-a împărțit activitatea între probleme științifice din varii domenii. A fost extrem de interesat de meteorologie, în cadrul căreia operațiile numerice păreau să ajute la crearea unor direcții cu totul noi; o parte a timpului și-a petrecut-o ajutând la realizarea de calcule în domeniul în plină dezvoltare al fizicii nucleare. A continuat să lucreze îndeaproape cu laboratoarele Comisiei pentru Energie Atomică și, în 1952, a devenit membru al comitetului general de consilieri al organizației.
La 15 martie 1955, Johnny a fost numit membru al Comisiei pentru Energie Atomică, așa că la începutul lui mai ne-am mutat la Washington. Trei luni mai târziu, în august, tiparul vieții noastre extrem de active și fascinante, ordonate în jurul minții lui neobosite și uimitoare, a dispărut brusc; Johnny a început să aibă dureri severe la umărul stâng, iar după operație a fost diagnosticat cu cancer osos. Lunile care au urmat au fost unele în care speranța alterna cu disperarea; uneori eram

încrezători că leziunea din umăr fusese o manifestare singulară a temutei boli, care nu va reapărea decât peste mult timp, dar durerile și înțepăturile generalizate pe care le acuza din când în când ne-au spulberat speranțele. Pe tot parcursul acestei perioade, Johnny a muncit febril - în timpul zilei, la birou sau în numeroasele călătorii pe care i le cerea slujba; noaptea, la lucrări științifice pe care le amânase până la terminarea treburilor pentru Comisie. A început să lucreze în mod sistematic la manuscrisul pentru Prelegerile Silliman; majoritatea paginilor care urmează au fost scrise în acele zile de incertitudine și așteptare. Pe la sfârșitul lui noiembrie a venit următoarea lovitură: i-au

>

fost descoperite mai multe leziuni la coloana vertebrală și a început să aibă dificultăți serioase de mers. Din acel moment, totul a mers din rău în mai rău, deși încă ne mai rămăsese un pic de speranță că, prin tratament și îngrijire, boala fatală putea fi oprită măcar pentru un timp.

In ianuarie 1956, Johnny a fost imobilizat în scaunul cu rotile, dar încă participa la întâlniri, după care era condus cu scaunul la birou si continua să lucreze la manuscri- j

sul său pentru prelegeri. Era clar că puterea îi scădea cu fiecare zi; toate călătoriile si conferințele au fost anulate una câte una, cu o singură excepție: Prelegerile Silliman. Aveam ceva speranțe că tratamentele cu raze X i-ar putea întări colana

măcar temporar, până la sfârșitul lui martie, astfel încât să reușească să călătorească până la New Haven și să își îndeplinească această singură obligație atât de importantă pentru el. Chiar și așa, Comitetului pentru Prelegerile Silliman trebuia să i se ceară să reducă și mai mult numărul prelegerilor — la una sau cel mult două -, pentru că efortul unei săptămâni întregi de conferințe ar fi fost extrem de periculos pentru sănătatea lui și așa precară. Insă până în martie, toate falsele speranțe au dispărut și nu se mai punea în niciun caz problema ca Johnny să călătorească undeva. Universitatea Yale, la fel de îndatoritoare și de înțelegătoare ca întotdeauna, nu a anulat prelegerile, ci a sugerat că, dacă manuscrisul era gata, putea să îl citească altcineva în locul lui. In ciuda numeroaselor eforturi, Johnny nu a putut termina la timp scrierea prelegerilor; de fapt, soarta tragică a făcut să nu Ie poată termina deloc.

La începutul lui aprilie, Johnny a fost internat la Spitalul Walter Reed; nu a mai ieșit din acel spital până în momentul morții, 8 februarie 1957. A luat cu el la spital manuscrisul neterminat al Prelegerilor Silliman, unde a mai făcut niște încercări de a-1 completa; dar boala devenise deja atotstăpânitoare și nici chiar mintea excepțională a lui Johnny nu a reușit să învingă slăbiciunea trupului.

Cer permisiunea de a-mi exprima adânca recunoștință față de Comitetul Prelegerilor

Silliman, Universitatea Yale și Yale University Press, pentru toată bunăvoința pe care au manifestat-o în ultimii ani triști din viața lui Johnny și pentru că acum îi onorează amintirea, permițând includerea manuscrisului lui, incomplet și neterminat, în cadrul seriei de publicații a Prelegerilor Silliman.

KLARA VON NEUMANN

Introducere

Washington, D.C., septembrie 1957

Din moment ce nu sunt nici neurolog și nici psihiatru, ci matematician, lucrarea care urmează necesită niște explicații și justificări. Ea reprezintă o abordare a înțelegerii sistemului nervos din punctul de vedere al matematicianului. Totuși, această afirmație trebuie lămurită pe loc în privința celor două părți esențiale ale ei. înainte de toate, este o exagerare să definesc ceea ce încerc să fac aici drept „o abordare în scopul înțelegerii"; este mai degrabă un set oarecum sistematizat de speculații despre modul în care ar trebui să se facă o astfel de abordare. Adică, încerc să ghicesc care dintre liniile de atac - ghidate matematic - par în mod aprioric promițătoare, de la distanța tulbure în care le vedem pe majoritatea, și care dintre ele au un aspect opus. De asemenea, voi oferi niște explicații raționale pentru aceste presupuneri.

In al doilea rând, „punctul de vedere al matematicianului", asa cum mi-as dori să fie înțeles în acest context, poartă cu sine o serie de accente care diferă de cele obișnuite. Pe lângă atenția deosebită acordată tehnicilor matematice generale, aspectele logice și statistice se vor afla în prim-plan. Mai mult, logica și statistica ar trebui privite în primul rând, dar nu exclusiv, ca instrumente esențiale ale „teoriei informației. De asemenea, acel calup de informații care s-a dezvoltat în jurul planificării, evaluării și codificării automatelor de calcul - complicate din punct de vedere logic și matematic - va fi elementul central al acestei teorii a informației. Cele mai obișnuite, dar nu singurele astfel de automate sunt, desigur, marile dispozitive electronice de calcul.
Permiteti-mi să remarc, în treacăt, că ar fi foarte satisfacă- tor dacă s-ar putea vorbi despre o „teorie“ a acestor dispozitive. Din nefericire, ceea ce există în acest moment - si ceea ce trebuie să utilizez - poate fi descris deocamdată doar ca un „calup de informații" imperfect explicate și prea puțin conturate.

In sfârșit, principalul meu scop este de fapt acela de a sublinia un aspect aparte al acestei probleme. Presupun că un studiu matematic mai aprofundat al sistemului nervos - „matematic" în sensul explicat anterior - va influența modul în care

înțelegem tocmai aspectele matematice implicate. De fapt, este posibil ca el să modifice felul în care privim elementele matematice și logice în discuție. Voi încerca să explic mai departe motivele pentru care am această convingere.

Partea I

Computerul

Voi începe prin a discuta despre unele dintre principiile care stau la baza clasificării și tehnologiei dispozitivelor de calcul.
Calculatoarele care există în momentul de față se împart în două mari clase: „analogice" și „digitale". Această clasificare apare în funcție de modul în care numerele cu care operează calculatorul respectiv sunt reprezentate în interiorul său.

Procedura analogică

Intr-un calculator analogic, fiecare număr este reprezentat de o mărime fizică adecvată, ale cărei valori, măsurate cu o unitate dinainte stabilită, sunt egale cu numărul în discuție. Această mărime poate fi unghiul cu care s-a rotit un anumit disc sau intensitatea unui anumit curent ori valoarea unei anumite tensiuni electrice (relative) etc. Pentru ca dispozitivul să fie capabil să calculeze, adică să opereze cu aceste numere conform unui plan predeterminat, este necesar să fie furnizate părți (sau componente) care să poată realiza operațiile matematice de bază asupra acestor mărimi reprezentative.

Operații de baza convenționale

Prin aceste operații de bază înțelegem de obicei „cele patru operații aritmeticei adunarea (operația x + y), scăderea (x - y), înmulțirea (operația xy) și împărțirea (x/y).

Evident, nu este dificil să se adune sau să se scadă doi curenți, prin suprapunerea lor în direcția paralelă sau antiparalelă. Multiplicarea (a doi curenți) însă este mai complicată, dar există diverse tipuri de componente electrice care realizează această operație. Același lucru este valabil și pentru împărțire (a unui curent la altul). (Pentru înmulțire, la fel ca pentru împărțire — dar nu pentru adunare și scădere —, este desigur esențială unitatea în care este măsurat curentul.)

Operații de baza neconvenționale

O trăsătură chiar remarcabilă a unora dintre calculatoarele analogice, despre care va trebui să vorbesc destul de mult în continuare, este

următoarea: uneori, dispozitivul e construit în jurul altor operații matematice „de bază“ decât cele patru operații aritmetice descrise anterior. Astfel, clasicul „analizor diferențial[44], care exprimă numere în funcție de unghiurile cu care s-au rotit anumite discuri, acționează după cum urmează: în loc de adunare, x + y, și scădere, x - y, se utilizează operațiile (x ± y) / 2, deoarece o componentă simplă, „diferențialul[44] (același care se folosește și la axul din spate al unui automobil), le produce. în loc de înmulțire, xy, se apelează la o procedură cu totul diferită: în analizorul diferențial, toate mărimile apar ca funcție de timp, iar analizorul utilizează o componentă numită „integrator", care pentru două astfel de mărimi x(t) și y(t) va forma integrala („Riemann-Stieltjes") z(t) = J'x(t) dy(t).
Scopul acestei scheme presupune trei aspecte:
în primul rând, cele trei operații anterioare, în combinații potrivite, vor reproduce trei dintre cele patru operații de bază obișnuite, si anume adunarea, scăderea si înmulțirea.
în al doilea rând, în combinație cu anumite bucle de „feedback", ele vor genera și cea de-a patra operație, împărțirea. Nu voi aduce acum în discuție principiul feedbackului, ci voi spune numai că, deși pare a fi un aparat pentru rezolvarea de relații implicite, de fapt este o deosebit de elegantă schemă de iterații în scurtcircuit și aproximări

succesive.
în al treilea rând - și aici este adevărata justificare a analizorului diferențial: operațiile sale de bază (x ± y) / 2 și folosirea integralei sunt, pentru clase largi de probleme, mai economice decât cele aritmetice (x + y, x — y, xy, x/y). Mai concret, pentru ca un dispozitiv de calcul să rezolve o problemă matematică complexă, el trebuie să fie „programat" pentru această sarcină. Aceasta înseamnă că operația complexă de rezolvare a problemei respective trebuie înlocuită printr-o combinație a operațiilor de bază ale dispozitivului. Adeseori, înseamnă ceva și mai subtil: aproximarea acelei operații - în orice grad dorit (prescris) - prin astfel de combinații. In practică, pentru o clasă dată de probleme, un set de operații de bază s-ar putea să fie mai eficient, adică să permită utilizarea unor combinații mai simple, mai puține decât un alt set de astfel de operații. In particular, pentru sisteme de ecuații cu diferențiale totale - pentru care a fost proiectat inițial analizorul diferențial -, operațiile de bază anterior menționate ale acelui dispozitiv sunt mai eficiente decât operațiile aritmetice de bază semnalate și mai înainte (x + y, x - y, xy, x/y).
în continuare, voi trece la categoria calculatoarelor digitale.

Procedura digitala

într-un calculator digital zecimal, fiecare număr este reprezentat la fel ca în scrierea convențională de mână sau de tipar, adică sub forma unei secvențe de cifre zecimale (digiți). Fiecare cifră zecimală, la rândul său, este reprezentată printr-un sistem de markeri.

Markerii - combinarea și manifestarea lor

Un marker care poate apărea în zece forme diferite este suficient prin el însuși pentru a reprezenta un digit. Un marker care poate apărea în numai două forme diferite va trebui utilizat astfel încât fiecare digit să corespundă unui grup întreg. (Un grup de trei markeri cu două valori fiecare permite opt combinații, ceea ce nu este suficient. Un grup de patru astfel de markeri permite 16 combinații; acest lucru este mai mult decât suficient. Prin urmare, pentru formarea unui număr zecimal trebuie folosite grupuri de cel puțin patru markeri. S-ar putea să apară necesitatea utilizării unor grupuri mai mari; a se vedea în continuare.) Un exemplu de marker cu zece valori este impulsul electric care apare pe una din zece linii prestabilite. Un marker cu două valori este impulsul electric care apare pe o singură linie predeterminată, astfel că prezența sau absența lui

reprezintă informația („valoarea" markerului). Un alt posibil marker cu două valori este un impuls electric care poate avea polaritate pozitivă sau negativă. Desigur, există multe alte scheme de markeri la fel de valide.
Voi mai face o singură observație cu privire la markeri. Markerul cu zece valori amintit anterior este în mod clar un grup de zece markeri cu două valori, cu alte cuvinte, este extrem de redundant în sensul menționat anterior.
>
Grupul de dimensiune minimă, construit din patru markeri cu două valori, poate fi de asemenea folosit în același cadru. Să ne gândim la un sistem de patru linii predeterminate, astfel încât impulsurile electrice (simultane) pot apărea în orice combinație a acestora. Asta permite existența a 16 combinații și se poate stipula ca oricare zece dintre ele să corespundă cifrelor zecimale.
A se remarca faptul că acești markeri, care sunt de regulă impulsuri electrice (sau tensiuni ori curenți electrici care durează atâta timp cât este necesar pentru ca indicația lor să fie validă), trebuie să fie controlați prin întrerupătoare electrice.

Tipurile de calculatoare digitale și componentele lor de baza

Pe parcursul dezvoltării de până acum, au fost folosite succesiv relee electromecanice, tuburi electronice cu vid, diode de cristal, miezuri feromagnetice și tranzistori - unele dintre ele folosite în combinație cu celelalte, altele, folo- site de preferință în cadrul componentelor de memorie ale calculatorului (vezi în continuare), iar altele, în afara memoriei (în cadrul componentelor „active“) — dând naștere unui număr la fel de mare de dispozitive digitale.

Scheme *în paralel și în serie*

Așadar, un număr din interiorul calculatorului este reprezentat printr-o succesiune de markeri cu zece valori (sau grup de markeri), care pot fi aranjați astfel încât să apară simultan în diferite componente ale calculatorului - în *paralel* — sau în succesiune temporală, într-un singur component al acestuia - în *serie.* Dacă acest calculator este construit pentru a gestiona, să spunem, numere zecimale cu douăsprezece poziții, de exemplu, cu șase poziții la stânga virgulei și cu șase la dreapta, atunci va fi nevoie de doisprezece astfel de markeri (sau grupuri de markeri) în fiecare canal de comunicație al calculatorului destinat transmiterii de numere. (Această schemă poate fi făcută mai flexibilă - și este, la diverse dispozitive - în diferite

modalități și grade. Astfel, în aproape toate calculatoarele, poziția punctului zecimal este ajustabilă. Totuși, nu voi discuta mai aprofundat despre aceste probleme aici.)

Operațiile de baza convenționale

Până acum, operațiile unui calculator digital s-au bazat întotdeauna pe cele patru operații aritmetice. In ceea ce privește bine-cunoscutele proceduri care se folosesc, ar trebui spuse următoarele:

In primul rând, adunarea: spre deosebire de procesele fizice care mediază acest proces în calculatoarele analogice (vezi anterior), această operație este controlată aici de reguli cu caracter strict și logic - cum se formează sume digitale, când se produce un transport[10] și cum trebuie repetate și combinate aceste operații. Natura logică a sumei digitale devine si mai clară atunci când se folosește sistemul binar ⌋ ⌊
(mai degrabă decât cel zecimal). Intr-adevăr, tabla binară a adunării (0 + 0 = 00, 0+1 = 1+ 0 = 01, 1 + 1 = 10) poate fi exprimată astfel: cifra binară care reprezintă suma este 1 dacă cele două numere zecimale însumate diferă, iar în caz contrar este 0; cifra binară transportată este 1
dacă ambele numere zecimale sunt 1, iar în caz contrar este 0. Din cauza posibilei prezențe a unei cifre binare transportate, de fapt este nevoie de o

10 Acea cifră pe care o „ținem minte" (o reportăm) când adunăm pe hârtie. *(N. red.)*

tablă binară a adunării pentru trei termeni (0 + 0 + 0 = 00, 0+0+l=0+l+ 0 = 1 + 0 + 0 = 01, 0+1 + 1 = 1+ 0+1 = 1 + 1+ 0=10, 1 + 1 + 1 = 11), iar acest lucru poate fi exprimat după cum urmează: cifra-sumă este 1 dacă numărul de cifre 1 din numerele zecimale adunate (inclusiv transportul) e impar (1 sau 3), iar în caz contrar este 0; transportul este 1 dacă numărul de cifre 1 din numerele zecimale adunate (inclusiv transportul din poziția precedentă) formează majoritatea (2 sau 3), iar în caz contrar este 0.

In al doilea rând, scăderea: structura logică a acesteia este foarte asemănătoare cu cea a adunării. Chiar poate fi - și de obicei este - redusă la operația anterioară, adunând descăzutul la complementul față de doi al scăzătorului.

In al treilea rând, în ceea ce privește înmulțirea: caracterul logic este și mai evident - iar structura mai complicată - decât în cazul adunării. Produsele (înmulțitorului) cu fiecare cifră a deînmulțitului sunt întâi formate (de obicei, realizate pentru toate cifrele zecimale posibile cu ajutorul diferitelor scheme de adunare), iar apoi sunt adunate împreună (prin suprapunerea cifrelor corespunză-toare în mod potrivit). Din nou, în sistemul binar caracterul logic este încă și mai transparent, și mai evident. Din moment ce singurele cifre zecimale posibile sunt 0 și 1, un produs digital (al deînmulțitului) (cu înmulțitorul) este omis pentru 0 și este înmulțitorul însuși pentru 1
.Toate acestea se aplică la produsele dintre factori

pozitivi. In cazul în care ambii factori pot avea și semnul minus, și semnul plus, intervin noi reguli logice care controlează cele patru situații care pot apărea.
In al patrulea rând, în ceea ce privește împărțirea: structura logică este comparabilă cu cea a înmulțirii, cu excepția faptului că acum intervine un șir de scăderi repetate, cu aproximări, cu reguli logice specifice (pentru formarea numerelor zecimale ce reprezintă câtul) în diferitele situații alternative care pot apărea și care trebuie rezolvate conform unei scheme seriale, repetitive.
In concluzie: toate aceste operații diferă acum radical de procesele fizice utilizate de calculatoarele analogice. Toate sunt modele de acțiuni alternative, organizate în secvențe extrem de repetitive și guvernate de reguli stricte și logice. Mai ales în cazul înmulțirii și împărțirii, aceste reguli au un caracter logic destul de complex. (Acest lucru ar putea să nu fie extrem de clar din cauza lungii și aproape instinctivei noastre familiarități cu ele, dar dacă ne străduim să observăm lucrurile în totalitatea lor, gradul lor de complexitate devine evident.)

Controlul logic

In afară de capacitatea de a executa singur operațiile de bază, un dispozitiv de calcul trebuie să le poată efectua

conform secvenței - sau, mai degrabă, conform tiparului logic - în care ele generează soluția problemei matematice ce reprezintă de fapt scopul calculului. La calculatoarele analogice tradiționale - exemplificate prin „analizorul diferențial" -, această „secvenționare“ a operației se obține în acest mod. Este necesar să existe *a priori* suficiente componente în interiorul dispozitivului pentru a efectua atâtea operații de bază câte sunt necesare pentru calculul dorit - adică suficiente „diferențiale" și „integratoare" pentru cele două operații de bază (x ± y) / 2, respectiv ?x(t) dy(t), conform celor enunțate anterior. Acestea - adică discurile lor de intrare și ieșire (sau, mai degrabă, axele acestora) - trebuie să fie în așa fel conectate una cu cealaltă (prin roți dințate la primele modele și prin aranjament electric sincron la modelele ulterioare), încât să constituie o replică a calculului de efectuat. Trebuie remarcat faptul că acest tipar de conexiune poate fi organizat după dorință - într-adevăr, acesta este mijlocul prin care problema de rezolvat - reprezentând intenția utilizatorului - este imprimată în calculator. Pentru dispozitivele de la început (cele cu conexiune pe bază de roți dințate, vezi anterior), această „setare" se realizează prin mijloace mecanice, iar la modelele ulterioare (cele cu conexiuni electrice, vezi anterior) prin

alimentare cu curent electric. Oricum, indiferent de tipul de calculator, există întotdeauna o setare prestabilită pentru întreaga durată de rezolvare a problemei.

Controlul prin întrerupător electric

In unele dintre ultimele modele de calculatoare analogice s-a introdus încă o îmbunătățire. Acestea aveau conexiuni electrice „cu întrerupător". Conexiunile în discuție erau, de fapt, controlate prin relee electromecanice și astfel puteau fi modificate prin stimularea electrică a magneților care închideau si deschideau aceste relee. Stimulii elec- trici puteau fi controlați prin benzi de hârtie perforată, iar respectivele benzi puteau fi pornite sau oprite (și repor- nite, și reoprite etc.) prin semnale electrice derivate din calculul în sine, la momentul potrivit.

Controlul logic ol benzilor

Ultima referință înseamnă că anumite componente numerice din interiorul calculatorului au ajuns la o anumită condiție prestabilită, spre exemplu, că semnalul unui anumit număr a devenit negativ sau că un număr a fost depășit ca valoare de un alt număr etc. A se remarca faptul că, dacă numerele sunt definite prin tensiuni electrice sau curenți, atunci semnul lor poate fi perceput prin aranja- mente de tip redresor; pentru un disc rotativ, semnul arată dacă a trecut de o poziție zero

deplasându-se spre stânga sau spre dreapta; un număr este depășit ca valoare de un alt număr atunci când semnul diferenței lor devine negativ etc. Astfel, un control „logic" al benzii — sau, mai bine zis, un control „al stării de calcul combinate cu banda" - a fost suprapus peste controlul de bază al „conexiunilor fixe".

Calculatoarele digitale au început direct cu sisteme diferite de control. Totuși, înainte de a discuta despre acestea, voi face niște remarci generale referitoare Ia ele și la relația lor cu calculatoarele analogice.

Principiul unei singure componente pentru fiecare operație de baza

Pentru început, trebuie subliniat faptul că la calculatoarele digitale este alocată, în mod constant, o singură componentă pentru fiecare operație de bază. Acest lucru vine în contrast cu situația majorității calculatoarelor analogice, la care trebuie să existe suficiente componente pentru fiecare operație de bază, în funcție de cerințele problemei în lucru (vezi anterior). Totuși, trebuie menționat că acesta este mai degrabă un fapt istoric decât o cerință intrinsecă - calculatoarele analogice (de tipul celor conectate electric, vezi anterior) ar fi putut, în principiu, să fie construite cu o singură componentă pentru fiecare operație de bază și un control logic din

oricare dintre tipurile digitale care urmează să fie descrise mai departe. (Intr-adevăr, cititorii pot verifica ei înșiși, fără mare dificultate, că tipurile „cele mai noi“ de sisteme de comandă pentru calculatoare analogice descrise anterior reprezintă o tranziție către acest *modus operands)*
In plus, ar trebui observat că unele dintre calculatoarele digitale se îndepărtează, mai mult sau mai puțin, de principiul „doar o singură componentă pentru fiecare operație de bază“ - dar aceste devieri pot fi aduse înapoi la schema tradițională prin reinterpretări destul de simple. (în unele cazuri este vorba doar despre a lucra cu un calculator duplex [sau multiplex], cu mijloace de intercomunicare adecvate.) în acest moment nu voi intra în astfel de detalii.

Necesitatea corespunzătoare pentru o componenta speciala de memorie

Principiul „doar o singură componentă pentru fiecare operație de bază“ necesită totuși asigurarea unui număr mai mare de componente pentru a stoca numere, în mod pasiv - rezultatul diverselor calcule intermediare, parțiale. Aceasta înseamnă că fiecare astfel de componentă trebuie să fie capabilă să „stocheze" un număr - eliminându-1 pe cel stocat anterior -, să îl preia de la o altă componentă cu care este conectată în acel moment și să îl „repete“ atunci când este „întrebată": să îl transmită unei

alte componente cu care este conectată în alt moment. O astfel de componentă se numește „registru de memorie", totalitatea acestor componente se cheamă „memorie", iar numărul de registre dintr-o memorie reprezintă „capacitatea" acelei memorii.
Acum se poate trece la discutarea principalelor moduri de control în cazul calculatoarelor digitale. Acest lucru se face cel mai bine prin descrierea a două tipuri de bază și prin menționarea câtorva principii evidente pentru combinarea lor.

Controlul prin puncte de „control secvențial"

Prima metodă fundamentală de control folosită pe scară largă poate fi descrisă (cu câteva simplificări și idealizări) astfel:
Calculatorul conține un număr de componente pentru controlul logic numite „puncte de control secvențial", cu următorul mod de funcționare. (Numărul acestor puncte de control secvențial poate fi destul de mare. La unele dintre calculatoarele mai noi s-a ajuns la câteva sute.)
In cel mai simplu mod de folosire a acestui sistem, fiecare punct de control secvențial este conectat la una dintre componentele pentru efectuarea operațiilor de bază pe care o acționează, precum și la registrele de memorie care trebuie să furnizeze intrările numerice ale acestei operații și la registrul ce primește valoarea numerică de ieșire a acesteia.

După un timp prestabilit (care trebuie să fie suficient de lung pentru efectuarea operației) sau după receptarea unui semnal „emis" (dacă durata operației este variabilă, nedefinită sau inacceptabil de lungă - această procedură necesită, desigur, o conexiune suplimentară la componenta în discuție, care efectuează operația în cauză), punctul de control secvențial declanșează următorul punct de control secvențial, „succesorul" său. Acesta funcționează, la rândul său, într-un mod similar, conform propriilor conexiuni. Dacă nu se face nimic mai mult, aceste acțiuni furnizează tiparul pentru un calcul necondiționat, fără repetări.
Tipare de execuție mai sofisticate se obțin dacă unele puncte de control secvențial, numite „puncte de ramificare", sunt conectate la doi „succesori" și devin capabile să se poziționeze în două stări, să spunem A sau B, unde A face ca procesorul să continue pe calea primului „succesor", iar B pe calea celui de-al doilea. Punctul de control secvențial este în mod normal în starea A, dar e conectat la două registre de memorie, iar anumite evenimente din interiorul acestuia îl vor face să treacă din starea A în starea B, respectiv din starea B în starea A - spre exemplu, apariția unui semn negativ în primul îl va face pe acesta să treacă din A în B, iar apariția unui semn negativ în cel de-al doilea îl va face pe acesta să treacă din B în A.
(Notă: pe lângă stocarea cifrelor unui număr, vezi

anterior, registrul de memorie stochează de obicei și semnul acestuia [+ sau -] - pentru aceasta fiind suficient un marker cu două valori.) Acum apar tot soiul de posibilități: cei doi „succesori" pot reprezenta două ramuri cu totul disjuncte ale calculului, în funcție de criterii numerice potrivit alocate - controlând calea „de la A către B", în timp ce calea „de la B către A" e folosită pentru a restabili starea inițială pentru un nou calcul. Este posibil ca aceste două ramuri alternative să se reunească mai târziu într-un succesor comun. Totuși, apare încă o posibilitate, atunci când una dintre ramuri, să spunem cea controlată de A, duce de fapt înapoi către primul punct de ramificare menționat, care face rutarea. In acest caz este vorba despre o procedură repetitivă, care continuă până când se îndeplinește un anumit criteriu numeric (cel care comandă calea „de Ia A către B“, vezi anterior). Acesta este, desigur, procesul iterativ de bază. Toate acțiunile sus-menționate pot fi combinate, suprapuse etc.

A se remarca faptul că, în acest caz, la fel ca în cel al controlului prin întrerupătoare electrice menționat anterior pentru calculatoarele analogice, totalitatea conexiunilor (electrice) la care se face referire constituie configurarea problemei - expresia problemei de rezolvat, adică a intenției utilizatorului. Deci, din nou, este vorba despre control pe bază de întrerupătoare. La fel ca în cazul la

care ne-am referit, tiparul de conectare poate fi schimbat de la o problemă la alta, dar - cel puțin în cazul aranjamentelor mai simple - rămâne fix pe toată durata problemei.
Această metodă poate fi îmbunătățită în multe moduri. Fiecare punct de control secvențial poate fi conectat la mai multe componente, activând mai mult de o operație. Conexiunea pe bază de întrerupător (ca în exemplul anterior, referitor la calculatoarele analogice) poate să fie de fapt controlată prin relee electromecanice, iar acestea pot fi (așa cum am menționat acolo) pornite prin benzi care, la rândul lor, pot să se miște sub controlul semnalelor electrice derivate din evenimente ale calculului. Nu o să intru aici în amănunte referitoare la toate variațiile pe care le permite această temă.

Controlul stocat în memorie

Cea de-a doua metodă de control de bază, care este în curs de a o înlocui pe prima, poate fi descrisă (din nou, cu anumite simplificări) după cum urmează:
Din punct de vedere formal, această schemă are anumite similitudini cu schema de control prin întrerupător descrisă anterior. Totuși, punctele de control secvențial sunt acum înlocuite de „comenzi". In cele mai multe instante ale acestei scheme, o comandă este același lucru, din punct de vedere fizic, cu un număr (dintre cele cu care

lucrează calculatorul respectiv, vezi anterior). Astfel, într-un calculator zecimal este o secvență de cifre zecimale. (Douăsprezece cifre în exemplul deja oferit, cu sau fără a se ține cont de semn, vezi anterior. Uneori, în spațiul standard al numărului este conținută mai mult de o singură comandă, dar nu e nevoie să intrăm în amănunte aici.)

O comandă trebuie să indice operația de bază ce trebuie efectuată, registrele de memorie din care trebuie să provină intrările operației și registrul în care trebuie să meargă ieșirea. Observați, aceasta presupune că toate registrele de memorie sunt numerotate în serie - numărul unui registru de memorie este numit „adresa" sa. E convenabil să se numeroteze și operațiile de bază. Astfel, o comandă conține, pur și simplu, numărul operației ei și adresele registrelor de memorie anterior menționate ca o secvență de cifre (într-o ordine stabilită).

Există câteva variante în acest sens, care totuși nu sunt * »
deosebit de importante pentru contextul de fată. In modul descris anterior, o comandă poate să controleze mai mult de o operație; poate dispune ca adresele pe care le conține să fie modificate în feluri specifice înainte de a fi aplicate în procesul de execuție (modificarea de adresă folosită în mod normal - și, practic, cea mai importantă - constă în

faptul de a aduna la toate adresele în chestiune valoarea conținută într-un registru de memorie specificat). Alternativ, aceste funcții pot fi controlate prin comenzi speciale sau o comandă poate afecta numai o parte a oricăreia dintre acțiunile constituente descrise mai sus.
O fază mai importantă a fiecărei comenzi este următoarea: la fel ca un punct de control secvențial din exemplul anterior, fiecare comandă trebuie să își determine succe- sorul - cu sau fără ramificare (vezi anterior). După cum am arătat deja, din punct de vedere „fizic“, o comandă este de obicei același lucru cu un număr. De aici și modalitatea naturală de a o stoca — în cursul problemei la al cărei control participă - într-un registru de memorie. Cu alte cuvinte, fiecare comandă este stocată în memo- rie - într-un registru de memorie definit, adică la o adresă anume. Acest fapt deschide posibilitatea unui număr de modalități specifice de a administra problema unei comenzi-succesor. Astfel, poate fi specificat faptul că succesoarea unei comenzi de la adresa X este - dacă nu e exprimat opusul - comanda de la adresa X + 1. „Opusul" este un „transfer", o comandă specială care specifică faptul că succesorul se află la o adresă Y predeterminată. Alternativ, fiecare comandă poate să aibă clauza de „transfer" subordonată în ea, adică să specifice în mod explicit adresa comenzii-succesor.

„Ramificarea" este rezolvată cel mai comod printr-o comandă de „transfer condițional", adică o comandă care specifică faptul că adresa succesorului este X sau Y, în funcție de îndeplinirea sau de neîndeplinirea unei condiții numerice - de exemplu, dacă un număr de la o anumită adresă Z este negativ sau nu. O astfel de comandă trebuie să conțină apoi un număr ce caracterizează acest tip anume de comandă (având astfel un rol similar și ocupând aceeași poziție cu numărul operației de bază la care ne-am referit ceva mai devreme) și adresele X, Y, Z, ca o secvență de cifre (vezi anterior).
A se observa diferența semnificativă dintre acest mod de control și cel pe bază de întrerupător menționat anterior: acolo, punctele de control secvențial erau obiecte fizice, reale, iar conectarea si deconectarea lor constituiau modul de reprezentare a problemei. Acum comenzile sunt entități ideale, stocate în memorie, așa încât cel care exprimă problema este conținutul acelui segment anume al memoriei. Datorită acestui fapt, tipul de control respectiv este numit „control stocat în memorie".

Modul de operare al controlului stocat în memorie

In acest caz, din moment ce comenzile care exercită întregul control se află în memorie, se

obține un grad mai mare de flexibilitate decât în orice formă anterioară de control. Intr-adevăr, sub controlul comenzilor sale, calculatorul poate extrage numerele (sau comenzile) din memorie, le poate procesa (ca numere!) și Ie poate trimite înapoi în memorie (în aceeași locație sau în altele); adică poate schimba conținutul memoriei - si, într-adevăr, acesta este modul său obișnuit de operare. Prin urmare, poate, în mod deosebit, să schimbe comenzile (din moment ce acestea se află în memorie!) — exact comenzile care controlează acțiunile mașinii. In acest mod, devin posibile tot felul de sisteme de comenzi sofisticate care continuă să se modifice succesiv, și astfel să modifice și procesele de calcul care se află sub controlul lor. Prin urmare, devin posibile procese mult mai complexe decât simplele iterații. Deși toate acestea pot părea exagerate și complicate, astfel de metode sunt folosite pe scară largă și sunt extrem de importante în cazul practicilor recente de folosire a dispozitivelor de calcul - sau, mai bine, a planificărilor de calcul.

Desigur, sistemul de comenzi - asta însemnând problema de rezolvat, intenția utilizatorului - este comunicat masi- nii prin „încărcarea" lui în memorie, lucru care se face, de regulă, cu ajutorul unei benzi înregistrate anterior sau cu sprijinul altui mediu de stocare similar.

Forme combinate de control

Cele două moduri de control descrise anterior - cel prin întrerupătoare și cel prin stocare în memorie - permit diverse combinații, despre care s-ar putea spune câteva cuvinte.

Să ne gândim la un dispozitiv de calcul cu control pe bază de întrerupătoare. Să presupunem că posedă o memorie de tipul despre care am discutat la dispozitivele cu control prin stocare în memorie. Starea curentă a tuturor întrerupătoarelor (deci, starea dispozitivului) poate fi descrisă printr-o serie de numere zecimale (de mărime potrivită). Această serie poate fi stocată în memorie; este de așteptat că va ocupa spațiul mai multor numere, adică niște registre de memorie consecutive — cu alte cuvinte, va fi găsită într-un număr de adrese consecutive, dintre care prima poate fi denumită, pe scurt, adresa ei. Memoria poate fi încărcată cu mai multe astfel de serii, reprezentând mai multe scheme de configurare a întrerupătoarelor.

In plus, dispozitivul de calcul poate avea un control complet, de tipul celui cu stocare în memorie. Pe lângă comenzile care se derulează de la sine în cadrul său (conform celor enunțate anterior), sistemul ar trebui să permită și comenzi de tipurile următoare. înainte de toate: o comandă care determină reconfigurarea stării întrerupătoarelor, conform secvenței digitale stocate la o adresă de memorie specificată (vezi anterior). în al doilea

rând, un sistem de comenzi ce modifică întrerupătoare singulare. (A se remarca faptul că ambele dispoziții presupun ca acționarea întrerupătoarelor să fie realizată efectiv prin dispozitive controlate electric, adică prin relee electromecanice [vezi discuția anterioară] sau prin tuburi cu vid, miezuri feromagnetice ori altele asemenea.) In al treilea rând: trebuie să existe o comandă care să schimbe tipul de control al mașinii, de la cel cu stocare în memorie la cel cu întrerupătoare.

Desigur, este necesar și ca schema de întrerupătoare să fie capabilă să desemneze ca succesor (sau ca unul dintre succesori, în cazul ramificării) controlul stocat în memorie (probabil Ia o adresă specificată).

Proceduri numerice combinate

Aceste remarci ar trebui să fie suficiente pentru a crea o imagine despre flexibilitatea inerentă a acestor moduri de control si a combinațiilor lor.

» >

O altă clasă de dispozitive de calcul „combinate" care merită menționată este cea în cadrul căreia principiile analogice și digitale se unesc. Pentru a fi mai exact: avem de-a face cu o schemă în care o parte a dispozitivului e analogică, o parte digitală, iar cele două comunică una cu cealaltă (pentru material numeric) și sunt supuse unui control comun. Alternativ, fiecare parte poate avea propriul ei control, caz în care cele două căi de control

trebuie

să comunice una cu cealaltă (pentru material logic). Desigur, acest aranjament necesită componente care pot transforma un număr dat sub formă digitală într-un număr dat sub formă analogică și viceversa. Prima cerință înseamnă crearea unei mărimi continue din expresia sa digitală, ultima înseamnă măsurarea unei mărimi continue și exprimarea rezultatului în formă digitală. Diversele tipuri de componente care îndeplinesc aceste două cerințe sunt bine cunoscute, inclusiv unele electrice rapide.

Reprezentări combinate ale numerelor. Dispozitive construite pe aceasta baza

O altă clasă semnificativă de dispozitive combinate le cuprinde pe cele în cazul cărora fiecare pas al procedurii de calcul (dar, desigur, nu al procedurii logice) combină principiile analogice și digitale. Cel mai simplu astfel de caz se produce atunci când un număr este reprezentat parțial analogic, parțial digital. Voi descrie o astfel de schemă care a fost folosită uneori la construirea și planificarea dispozitivelor de calcul și a componentelor acestora, precum și în anumite tipuri de comunicare, deși niciun dispozitiv folosit la scară largă nu s-a bazat pe utilizarea ei.

In acest sistem, pe care îl voi numi sistemul de „densitate a impulsului", fiecare număr este reprezentat printr-o serie de impulsuri electrice

succesive (pe o singură linie), astfel încât nu lungimea seriei contează, ci densitatea medie a secvenței impulsurilor (în timp), care este numărul de reprezentat. Desigur, trebuie specificate două intervale de timp, tj și t_2 (t_2 fiind mult mai mare decât tj), astfel încât aproximarea în discuție să fie aplicată la durate aflate între t_1 și t_2. Trebuie specificată unitatea în care se exprimă numărul în chestiune atunci când este echivalat cu densitatea lui. Uneori este convenabil să lăsăm ca densitatea în discuție să fie egală nu cu numărul însuși, ci cu o funcție monotonă convenabilă a lui - de exemplu, logaritmul. (Scopul acestei abordări este obținerea unei claritați mai mari a reprezentării, atunci când e nevoie - când numărul este mic -, si a uneia mai slabe, dacă acest lucru este acceptabil - când numărul este mai mare -, și să avem orice continuitate între cele două.)
Este posibil să fie concepute părți componente care aplică toate cele patru operații aritmetice la aceste tipuri de numere. Astfel, atunci când densitățile reprezintă numerele în sine, adunarea poate fi efectuată prin combinarea celor două secvențe. Celelalte operații sunt oarecum mai dificile - dar există și în cazul acestora proceduri adecvate și mai mult sau mai puțin elegante. Nu voi discuta modul în care sunt reprezentate numerele negative, atunci când este cazul, deoarece și acest lucru se rezolvă ușor prin artificii potrivite.

Pentru a dobândi precizia necesară, fiecare secvență trebuie să conțină multe impulsuri în același interval de timp t_1 menționat anterior. Dacă, pe parcursul calculului, se dorește schimbarea unui număr, densitatea sec- venței sale poate fi modificată în consecință, cu condiția ca procesul să se deruleze încet în raport cu intervalul de timp t_2 menționat anterior.

Pentru acest tip de dispozitiv, detectarea condițiilor numerice (de exemplu, în scop de control logic, vezi anterior) poate fi destul de complicată. Totuși, există diverse dispozitive care convertesc un astfel de număr, adică densitatea în timp a impulsurilor, într-o mărime analogică. (De exemplu, densitatea de impulsuri, unde fiecare impuls livrează o sarcină electrică standard unui condensator cu descărcare lentă [printr-o rezistență dată], va controla condensatorul până la anumite valori rezonabile de tensiune si curent de descărcare - ambele fiind cantități analogice utilizabile.) Aceste mărimi analogice pot fi apoi utilizate pentru control logic, cum am discutat anterior.

După această descriere a principiilor generale de funcționare și control ale dispozitivelor de calcul, voi face câteva remarci referitoare la utilizarea lor practică și la principiile care guvernează acest lucru.

Precizia

Mai întâi, permiteți-mi să compar utilizarea dispozitivelor analogice cu a celor digitale. Dincolo de orice alte considerații, principala limitare a dispozitivelor analogice se leagă de precizie. Intr-adevăr, precizia dispozitivelor electrice analogice rareori depășește 1 : IO^3, și chiar și cele mecanice, precum analizorul diferențial, ajung cel mult de la 1 : IO^4 la $1:10^5$. Pe de altă parte, dispozitivele digitale pot ajunge la orice precizie se dorește; de exemplu, dispozitivul duodecimal la care m-am referit anterior are o precizie de $1:10^{12}$ (din motive ce urmează să fie discutate mai departe, acesta este un nivel de precizie oarecum tipic pentru un dispozitiv digital modern). A se observa, de asemenea, că a crește precizia este un lucru mult mai ușor de realizat în regim digital decât în regim analogic. Trecerea de la $1:10^3$ la $1:10^4$ într-un analizor diferențial este relativ simplă; de la $1:10^4$ la $1:10^5$ este maximum posibil cu mijloacele tehnice din prezent, iar trecerea de la 1 : IO^5 la 1 : IO^6 este imposibilă (cu mijloacele actuale). Pe de altă parte, a trece de la $1:10^{12}$ la $1:10^{13}$ într-un dispozitiv digital înseamnă doar adăugarea unei noi poziții după cea a douăsprezecimilor, fapt care de regulă nu semnifică mai mult decât o relativă mărire a echipamentului (nu în toate cazurile!) cu Vi 2 = 8,3 la sută și o

pierdere similară a vitezei (nu în toate cazurile!) - niciuna dintre acestea nereprezentând o modificare serioasă. Sistemul bazat pe densitatea impulsului electric este comparabil cu sistemul analogic; de fapt, situația este chiar mai rea decât în cazul acestuia: precizia este implicit scăzută. Intr-adevăr, o precizie de $1:10^2$ necesită, de regulă, existența a IO^2 impulsuri în intervalul de timp t (vezi anterior) - adică viteza dispozitivului este redusă, numai prin acest fapt, cu un factor în valoare de 100. Pierderile de viteză de asemenea magnitudine sunt de regulă greu de suportat, iar unele în mod semnificativ mai mari pot fi considerate chiar prohibitive.

Motive pentru cerințele de înalta precizie (digitala)

Totuși, în acest moment apare necesitatea unei noi întrebări: până la urmă, de ce este necesară o astfel de precizie extremă (cum ar fi cea digitală de $1:10^{12}$)? De ce preciziile analogice tipice (de $l:10^4$) sau chiar cele ale sistemului bazat pe densitatea impulsului electric (de $1:10^2$) nu sunt suficiente? La majoritatea problemelor de matematică aplicată și de inginerie, datele nu sunt mai precise decât valoarea de $1 : IO^3$ sau $1 : IO^4$ și, adeseori, nici nu ajung la nivelul de $1:10^2$, iar pentru răspunsuri nu este necesară și nici nu are prea multă însemnătate o precizie mai mare. In chimie, biologie, economie

sau în alte materii practice, nivelurile de precizie necesită, de regulă, și mai puțină acuratețe. Totuși, experiența generală în cazul calculatoarelor moderne de mare viteză arată că până și nivelurile de precizie de 1 : IO^5 sunt inadecvate pentru o mare parte a problemelor importante și că existența dispozitivelor digitale cu o precizie de $1:10^{10}$ și 1 : IO^{12} este cu totul justificată în practică. Cauzele acestui fenomen surprinzător sunt interesante și semnificative. Ele sunt legate de structura inerentă a actualelor procedee matematice și numerice.

Un fapt caracteristic acestor proceduri este că, atunci când sunt fragmentate până la nivelul elementelor lor constituente, se dovedesc a fi extrem de lungi. Acest lucru este valabil pentru toate problemele care justifică utilizarea unui dispozitiv rapid de calcul - adică pentru toate cele cu un grad de complexitate cel puțin mediu. Motivul care se află la baza acestui fapt este că metodele actuale de calcul necesită analizarea tuturor funcțiilor matematice în combinații de operații de bază - iar acestea înseamnă, de regulă, cele patru operații aritmetice sau ceva comparabil cu ele. De fapt, majoritatea funcțiilor pot fi aproximate doar în acest mod, iar aceasta înseamnă secvențe de operații de bază destul de lungi, posibil definite iterativ (vezi anterior). Cu alte cuvinte,

„adâncimea aritmetică" a operațiilor necesare este de obicei destul de mare. A se remarca faptul că „adâncimea logică" este încă și mai mare si creste cu un factor considerabil - si anume, dacă, de exemplu, cele patru operații aritmetice sunt fragmentate în pașii logici din care sunt alcătuite (vezi anterior), fiecare dintre ele reprezintă, prin ea însăși, un lanț logic de dimensiuni mari. Totuși, aici nu este nevoie să se ia în considerare decât adâncimea aritmetică.

Așadar, dacă există un număr mare de operații aritmetice, erorile care apar în fiecare dintre acestea se suprapun. Din moment ce erorile sunt în principal (deși nu în întregime) aleatorii, rezultă că, dacă există N operații, eroarea va crește nu de N, ci de circa V_N ori. Acest lucru în sine, ca regulă, nu ar fi suficient pentru a face necesară o precizie graduală de 1 : IO^{12} pentru un rezultat general de 1 : IO^3 (vezi anterior). Pentru ca faptul să fie adevărat, ar fi nevoie de $1/10^{12}$ V_N- $1/10^3$, adică N - IO^{16}, însă chiar și la cele mai puternice calculatoare moderne, N abia dacă trece de IO^{10}. (Un calculator care realizează o operație aritmetică la fiecare 20 de microsecunde și lucrează la o singură problemă timp de 48 de ore reprezintă mai degrabă un caz extrem. Totuși, nici măcar aici nu este posibil mai mult de N - IO^{10}!) Insă intervine o altă circumstanță. Operațiile făcute în cursul calculului ar putea să amplifice erorile introduse prin calculele anterioare. Acest lucru poate duce foarte rapid la o eroare numerică de mari dimensiuni. Raportul folosit anterior, de $1:10^3$ până la 1 : IO^{12}, are drept rezultat o valoare de IO^9; și totuși, 425 de operații succesive, fiecare dintre ele crescând eroarea cu numai 5 procente, ar putea să ducă la această valoare! Nu voi încerca să fac aici vreo estimare detaliată și realistă, mai ales pentru că arta calculului automat constă în măsuri deloc

puține care să mențină acest efect la o valoare scăzută. După multă experiență, concluzia este că, la orice nivel, gradul mare de precizie la care ne-am referit anterior este justificat imediat ce ne lovim de probleme rezonabil de complexe.
înainte de a părăsi subiectul direct al dispozitivelor de calcul, voi spune câteva cuvinte despre viteza, mărimea lor și altele asemenea.

Caracteristici ale calculatoarelor analogice moderne

Ordinul de mărime a numărului de componente care se ocupă de operațiile de bază în cele mai mari calculatoare analogice care există la ora actuală este între 100 și 200.
Natura acestor componente depinde, desigur, de procesul analogic utilizat. In trecutul apropiat, ele au fost preponderent electrice sau măcar electromecanice (partea mecanică servind la mărirea preciziei, vezi anterior). Atunci când calculatorului i se furnizează un control logic elaborat (vezi anterior), acest lucru adaugă sistemului (ca orice control logic de acest tip) anumite componente tipice cu acțiune digitală, cum ar fi releele electromecanice sau tuburile cu vid (cele din urmă nu ar fi supuse, în acest caz, la viteze deosebit de mari). Numărul lor poate să ajungă până la câteva mii. Costul unui astfel de calculator poate ajunge, în cazuri extreme, până la 1 000000

de dolari.

Caracteristici ale calculatoarelor digitale moderne

Alcătuirea calculatoarelor digitale de mari dimensiuni este mai complexă. Ele sunt construite din componente „active“ și din componente care au rol în funcția de „memorie" - voi include printre acestea din urmă componentele de „intrare" și de „ieșire", deși acest lucru nu se obișnuiește. Componentele active sunt următoarele. întâi de toate, componente care îndeplinesc acțiunile logice de bază: sesizează coincidente, combină stimuli si, eventual, sesi- zează anticoincidențe (nu este necesar mai mult de atât, deși uneori sunt furnizate și componente pentru operații logice mai complexe). în al doilea rând, componente care regenerează impulsuri: le refac energia pierdută progresiv sau, pur și simplu, le ridică de la nivelul de energie predominant într-o parte a calculatorului la un alt nivel (mai mare) din altă parte (aceste două funcții se numesc amplificări) - refăcând forma și temporizarea dorită a impulsului (între anumite limite standardizate). A se observa că operațiile logice menționate la început sunt elementele pe baza cărora se construiesc cele aritmetice (vezi anterior).

Componentele active, aspecte legate de viteza

Toate aceste funcții au fost îndeplinite, în succesiune istorică, de relee electromecanice, tuburi cu vid, diode de cristal, miezuri feromagnetice și tranzistori (vezi anterior) sau de diverse circuite mici în care se foloseau acestea. Releele au permis să se ajungă la o viteză de circa IO^{-2} secunde per acțiune logică elementară, tuburile cu vid au făcut posibilă îmbunătățirea acesteia până la ordinul IO^{-5} ori IO^{-6} secunde (în cazuri extreme, ajungându-se chiar la o jumătate sau la un sfert din ultima valoare). Ultimul grup, cunoscut sub numele colectiv de SSD („solid state devices" - dispozitive în stare solidă), a ajuns la nivelul de viteză de IO^{-6} secunde (în unele cazuri, la un mic multiplu al acestei valori) și este probabil ca viteza să crească până la 10^{-7} secunde per acțiune logică elementară sau chiar și mai mult. Este de așteptat ca alte dispozitive, despre care nu voi discuta aici, să ne ducă încă și mai departe - mă aștept ca, mai devreme de zece ani din momentul de față, să ajungem la nivelul de IO^{-8} sau IO^{-9} secunde.

Numărul necesar de componente active

Intr-un calculator modern mare, numărul componentelor active variază, în funcție de tipul acestuia, de la 3 000 până la aproximativ 30000. In

cadrul său, operațiile de bază (aritmetice) sunt realizate de obicei de către un suban- samblu (sau, mai degrabă, de un grup de subansambluri mai mult sau mai puțin îmbinate), „unitatea aritmetică". Intr-un calculator modern mare, această componentă este construită, în funcție de tipul acesteia, din aproximativ 300 până la 2 000 de componente active.

După cum se va observa mai departe, anumite agregate de componente active sunt folosite pentru îndeplinirea unor funcții legate de memorie. De regulă, acestea sunt alcătuite din 200 până la 2 000 de componente active.

In cele din urmă, agregatele de „memorie" (propriu-zise) (vezi mai departe) necesită subansambluri auxiliare de componente active pentru a le deservi și administra. In cazul celui mai rapid grup de memorie care nu este compus din componente active (vezi mai departe - în terminologia utilizată aici, acesta este cel de-al doilea nivel al ierarhiei de memorie), acest rol ar putea să necesite de la 300 până la 2 000 de componente active. Pentru totalul părților care constituie împreună memoria, în general, necesarul corespunzător de componente active auxiliare se poate ridica până la 50 de procente din întregul calculator.

Componente de memorie, timpi de acces și capacități ale memoriei

Componentele de memorie aparțin mai multor clase. Caracteristica după care sunt clasificate este „timpul de acces". Timpul de acces se definește după cum urmează. In primul rând: timpul necesar pentru stocarea unui număr care este deja prezent într-o altă parte a dispozitivului de calcul (de obicei, într-un registru de componente active, vezi mai departe) — îndepărtând numărul pe care componenta de memorie este posibil să îl fi stocat anterior. în al doilea rând: timpul necesar pentru „a repeta“ numărul stocat - la „cerere" - către o altă parte a dispozitivului, care îl poate accepta (de regulă, către un registru de componente active, vezi mai departe). Ar putea fi convenabil să se facă distincția între acești doi timpi de acces („intrare" și „ieșire") ori să se utilizeze unul singur, cel mai mare dintre cele două, sau, eventual, media lor. De asemenea, timpul de acces poate să varieze sau nu de la caz la caz - dacă nu depinde de adresa de memorie, este numit „acces aleatoriu". Chiar dacă e variabil, este posibil să se utilizeze o singură valoare, timpul de acces maxim sau, eventual, cel mediu. (Desigur, acesta din urmă poate depinde de proprietățile statistice ale problemelor de rezolvat.) Oricum, pentru simplificare, voi utiliza aici un singur timp de acces.

Registre de memorie construite din componente active

Registrele de memorie pot fi construite din componente active (vezi anterior). Acestea au cel mai scurt timp de acces și sunt cele mai scumpe. Un astfel de registru, împreună cu facilitățile sale de acces, este un circuit de cel puțin patru tuburi cu vid (sau, alternativ, nu mult mai puține SSD-uri[11]) per bit (cifră binară) sau pentru un semn, și deci de cel puțin patru ori mai mult pentru cifrele zecimale (vezi anterior). Astfel, sistemul de cifre (și semne) duodécimale la care ne-am referit anterior ar necesita în mod normal, în aceste condiții, un registru cu 196 de tuburi. Pe de altă parte, astfel de registre au timp de acces de una sau două reacții elementare - ceea ce înseamnă o mare rapiditate în comparație cu alte posibilități (vezi mai departe). De asemenea, mai multe registre de acest tip pot fi integrate, facându-se astfel o oarecare economie de echipament; oricum, sunt necesare ca părți componente de acces de „intrare" și de „ieșire" pentru alte tipuri

11 Componente în stare solidă. Pentru a se evita orice confuzie, trebuie menționat faptul că SSD-urile la care se referă von Neumann sunt componente electronice bazate pe cristale semiconductoare solide; în prezent însă, SSD-urile desemnează unități de stocare de date din calculatoarele moderne. *(N. red.)*

de memorie; iar una sau două dintre ele (în unele cazuri, chiar trei) servesc ca parte a unității aritmetice. Pentru a trage o concluzie: în cantități moderate, aceste registre sunt mult mai rentabile decât era de așteptat și, în aceeași măsură, sunt necesare și ca părți subordonate altor componente din calculator. Totuși, se pare că nu sunt potrivite pentru a furniza memoria de mare capacitate de care este nevoie pentru aproape toate marile dispozitive de calcul. (Această din urmă observație se aplică numai dispozitivelor moderne, adică cele din era tuburilor cu vid si cele ulterioare. înainte de asta, la mașinile cu relee - vezi ante- rior -, releele erau utilizate pe post de componente active, iar registrele cu relee erau folosite ca principală formă de memorie. Astfel, si discuția care urmează trebuie înțeleasă ca referindu-se numai la dispozitivele de calcul moderne.)

Principiul ierarhic pentru componentele de memorie

Pentru aceste capacități extinse de memorie, trebuie utilizate așadar alte tipuri de memorie. Aici intervine principiul ierarhiei memoriei. Sensul acestui principiu este următorul:

Pentru o funcționare corectă - rezolvarea problemelor pentru care a fost creat -, un calculator poate avea nevoie de o capacitate de un anumit număr — să spunem N — de cuvinte, la un

anumit timp de acces, să spunem t. Acum, s-ar putea să fie dificil din punct de vedere tehnologic sau extrem de costisitor - acesta din urmă fiind modul în care, de regulă, se manifestă astfel de dificultăți - să se asigure N cuvinte cu timpul de acces t. Totuși, s-ar putea să nu fie necesar să avem toate cele N cuvinte funcționând la acest timp de acces. S-ar putea ca un număr considerabil mai mic de cuvinte, să spunem N', să fie efectiv necesar la timpul de acces t. Mai mult, s-ar putea ca - odată ce se furnizează N' cuvinte la timpul de acces t - întreaga capacitate de N cuvinte să fie necesară la un timp de acces mai mare, t". Continuând pe aceeași direcție, se poate întâmpla să fie mult mai economic să se furnizeze anumite capacități intermediare, în plus față de cele prezentate anterior - capacități mai mici decât N, dar mai mari decât N ' cuvinte, funcționând cu timpi de acces mai mari decât t, dar mai mici decât t". Schema cea mai generală, din acest punct de vedere, este furnizarea unei secvențe de capacități N_p N_2, ..., N_k , N_k și de timpi de acces t_p t_2, ..., t_k , t_k, astfel încât aceste capacități să devină din ce în ce mai ample, la timpi de acces din ce în ce mai mari, pe măsură ce secvența progresează, adică $N_1 < N_2 < ... < N_k < N_k$ și $t < t_2 < ... < t_k < t_k$ - astfel încât să fie necesare N cuvinte, la timpul de acces t., pentru fiecare i = 1,2, ... k-1, k. (Pentru ca aceasta să se

potrivească cu ceea ce s-a spus anterior, trebuie să se presupună faptul că $N_1 = N^z$, t, = t si N. = N, t. = t".) In această schemă, fiecare valoare a lui i reprezintă un nivel în cadrul ierarhiei memoriilor, iar ierarhia are k astfel de niveluri.

Componentele de memorie, aspecte legate de acces

Intr-un dispozitiv de calcul modern de dimensiune și viteză mare, o numărătoare completă a nivelurilor din ierarhia memoriei va dezvălui cel puțin trei, posibil, patru sau cinci astfel de niveluri. Primul nivel corespunde întotdeauna registrelor menționate anterior. Numărul lor, N , este de cel puțin trei la aproape toate tipurile de calculatoare, uneori mai mare - au fost propuse ocazional chiar și numere precum 20. Timpul de acces t este timpul de comutare de bază al componentelor elementare ale calculatorului mașinii (sau, posibil, de două ori mai mult decât acel timp).

Următorul (al doilea) nivel din cadrul ierarhiei este întotdeauna obținut cu ajutorul componentelor de memorie specifice. Acestea sunt diferite de componentele de comutare folosite în restul calculatorului (și în primul nivel al ierarhiei, vezi anterior). Componentele de memorie folosite la ora actuală pentru acest nivel au de obicei capacități de memorie N , care variază de la câteva mii la câteva zeci de mii de cuvinte (capacități din ultima

categorie se află încă în faza de proiectare). Timpul de acces t_2 este de regulă de cinci sau de zece ori mai mare decât cel de la nivelul anterior, t . Nivelurile care urmează corespund de obicei unei creșteri a capacității de memorie N cu un factor de aproximativ 10 la fiecare treaptă. Timpul de acces t. crește chiar mai repede, dar în acest caz intervin și alte reguli limitatoare și de calificare referitoare la timpul de acces (vezi mai departe). O discuție amănunțită cu privire la acest subiect ar necesita un grad de detaliere care nu pare necesar la acest moment.

Cele mai rapide componente, care sunt părți specifice de memorie (adică nu părți active, vezi anterior), sunt anumite dispozitive electrostatice și grupuri de miezuri magnetice. Utilizarea celor din urmă pare să fie din ce în ce mai frecventă, deși ar putea să intre sau să reintre în calcul și alte tehnici (electrostatice, feroelectrice etc.). Pentru nivelurile ulterioare ale ierarhiei memoriei, tamburii magnetici și benzile magnetice sunt cele mai utilizate, la ora actuală[12]; ocazional s-a sugerat și încercat folosirea discurilor magnetice.

12 Această afirmație era valabilă la momentul redactării lucrării de față; în prezent însă, aceste tehnologii de memorie au fost de foarte mult timp abandonate în detrimentul memoriilor SRAM și DRAM bazate pe tranzistori de dimensiuni nanometrice. *(N. red.)*

Complexitatea conceptului de timp de acces

Ultimele trei dispozitive sus-menționate sunt toate subiectul unor reguli și limitări speciale de acces: o memorie pe tambur magnetic prezintă toate părțile sale în mod succesiv și ciclic pentru acces; capacitatea de memorie a unei
benzi este practic nelimitată, dar își prezintă părțile în succesiune liniară, fixă, care poate fi oprită și chiar inversată, dacă se dorește asta; toate aceste scheme pot fi combinate în aranjamente diverse, care oferă o sincronizare specială între funcționarea calculatorului și secvențele de memorie fixă.

Cea din urmă etapă a oricărei ierarhii a memoriei este, inevitabil, lumea exterioară - aceasta înseamnă lumea exterioară din punctul de vedere al calculatorului, adică acea parte a ei cu care calculatorul poate comunica în mod direct, cu alte cuvinte, componentele sale de intrare și ieșire. De regulă, acestea sunt benzi de hârtie sau cartele perforate, iar pe partea de ieșire, desigur, tot hârtie imprimată. Uneori, o bandă magnetică este sistemul final de intrare-ieșire al calculatorului, iar traducerea ei într-un format pe care omul îl poate folosi în mod direct - adică hârtie perforată sau tipărită - se realizează separat de calculator.

Următorii sunt câțiva timpi de acces în termeni

absoluți. Pentru memoriile existente, pe bază de miez magnetic, 5 până la 15 microsecunde; pentru memorii electrostatice, 8 până la 20 de microsecunde; pentru tamburi magnetici, 2 500 până la 20000 de rotații pe minut, adică o rotație per 24 până la 3 milisecunde - în acest timp pot fi alimentate 1 până la 2 000 de cuvinte; pentru benzile magnetice, viteze de până la 70000 de linii pe secundă, adică o linie în 14 microsecunde; un cuvânt poate fi constituit din 5 până la 15 linii.

Principiul adresării directe

Toate calculatoarele existente și toate tipurile de memorie folosesc „adresarea directă[44], ceea ce înseamnă că fiecare cuvânt din memorie are o adresă numerică proprie, care îl caracterizează pe el și poziția sa în cadrul memoriei (agregatul tuturor nivelurilor ierarhice) în mod unic. Această adresă numerică este întotdeauna specificată explicit atunci când cuvântul din memorie trebuie citit sau scris. Uneori nu toate părțile memoriei sunt accesibile în același timp (vezi anterior; de asemenea, pot fi memorii multiple, și nu toate pot fi accesate în același timp, existând anumite dispoziții în ceea ce privește prioritatea accesului). în acest caz, accesul la memorie depinde de starea generală a calculatorului la momentul în care este cerut accesul. Oricum, nu există niciodată vreo ambiguitate în ceea ce privește adresa și locul pe care îl desemnează ea.

Partea a II-a

Creierul uman

Până la acest punct, discuția a asigurat bazele pentru comparația care reprezintă obiectivul acestei lucrări. Am descris cu un anumit grad de detaliu natura dispozitivelor de calcul moderne și gama de principii alternative în jurul cărora pot fi organizate. Acum putem trece la celălalt termen al comparației, sistemul nervos uman. Voi discuta elementele de similitudine și diferențele dintre aceste două „aparate“. Scoaterea în evidență a elementelor de asemănare duce la un teritoriu bine cunoscut. Există însă si ele- » mente de diferențiere - nu numai în cadrul aspectelor, destul de evidente, de viteză si mărime, ci si în anumite zone mai profunde. Acestea implică principiile de funcționare și control, organizarea generală etc. Principalul meu scop este să discut în amănunt unele dintre acestea. Totuși, pentru a fi apreciate așa cum se cuvine, sunt necesare atât o juxtapunere și o combinare a punctelor de similitudine, cât și a celor de diferențiere superficială (mărime, viteză, vezi anterior). Prin urmare, discuția trebuie să pună un accent considerabil și pe acestea.

Descrierea simplificatâ a funcției neuronului

Cea mai la îndemână observație în ceea ce privește sistemul nervos e că funcționarea lui este, la prima vedere, digitală. E necesar să discutăm oarecum mai în amănunt acest aspect, precum și structurile și funcțiile pe care se bazează afirmația de fată. » » Componenta de bază a acestui sistem este *celula nervoasă. neuronul,* iar funcția normală a unui neuron este să genereze și să transmită un *impuls nervos.* Acest impuls reprezintă un proces destul de complex, cu o varietate de aspecte - electrice,

chimice și mecanice. Totuși, se pare că acesta este definit în mod corect ca un proces unic, adică aproape același în orice condiții; reprezintă un răspuns unitar, în linii mari reproductibil, la o varietate destul de mare de stimuli.
Permiteți-mi să discut ceva mai detaliat despre acest lucru - și anume despre aspectele impulsului nervos care par să fie cele mai relevante în prezentul context.

Natura impulsului nervos

Celula nervoasă este construită dintr-un *corp* propriu-zis de la care pornesc, direct sau indirect, una sau mai multe ramificații. O astfel de ramificație poartă numele de *axon* al celulei. Impulsul nervos este o schimbare continuă, propagată - de regulă, cu o viteză stabilită, care totuși poate fi o funcție a celulei nervoase implicate - de-a lungul axonului (sau mai degrabă de-a lungul fiecărui axon). Cum am menționat anterior, această condiție poate fi privită sub mai multe aspecte. Una dintre caracteristicile sale este, cu siguranță, aceea că reprezintă o perturbare electrică; de fapt, cel mai frecvent este descrisă ca fiind exact aceasta. Respectiva perturbare are de obicei un potențial electric de aproximativ 50 de milivolți și durează circa o milisecundă. Concomitent cu această perturbare electrică au loc și niște schimbări chimice de-a lungul axonului. Astfel, în zona

axonului străbătută de potențialul electric al impulsului, compoziția ionică a lichidului intracelular se modifică și la fel se întâmplă și cu proprietățile elec- trochimice (conductivitate, permeabilitate) ale peretelui axonului, *membrana,.*
La terminațiile axonului, caracterul chimic al schimbării este și mai evident; atunci când apare impulsul, acolo își fac simțită prezența anumite substanțe specifice și caracteristice. In cele din urmă, există probabil și schimbări mecanice. Intr-adevăr, este foarte plauzibil ca schimbările diverselor permeabilități ionice ale *membranei* celulare (vezi anterior) să apară numai odată cu reori- entarea moleculelor acesteia, adică prin schimbări mecanice care implică pozițiile relative ale acestor constituenți.
Trebuie adăugat că toate aceste schimbări sunt reversibile. Cu alte cuvinte, odată ce impulsul a trecut, toate structurile axonului și părților lui constituente revin la starea inițială.

>

Din moment ce toate aceste efecte se petrec la scară moleculară — grosimea membranei celulare este de ordinul a câteva zecimi de microni (adică 10^{-5} cm), ceea ce reprezintă o dimensiune moleculară pentru moleculele organice mai mari implicate aici -, distincțiile făcute anterior dintre efectele electrice, chimice si mecanice nu sunt atât de clare cum ar putea părea inițial. Intr-adevăr, la

scară moleculară nu există distincții precise între aceste tipuri de schimbări: fiecare modificare chimică este indusă de o schimbare a forțelor intramoleculare care determină la
>
rândul său o modificare în pozițiile relative ale moleculelor; cu alte cuvinte, este indusă mecanic. In plus, fiecare astfel de schimbare mecanică intramoleculară modifică proprietățile electrice ale moleculei implicate și, prin urmare, induce proprietăți electrice modificate și niveluri diferite de potențial electric relativ. Pentru a trage o concluzie: la scară obișnuită (macroscopică), procesele electrice, chimice și mecanice reprezintă alternative între care pot fi menținute distincții clare. Insă, la nivelul aproape molecular al membranei nervoase, toate aceste aspecte tind să se combine. De aceea nu este surprinzător faptul că impulsul nervos se dovedește a fi un fenomen ce poate fi văzut din perspectiva oricăruia dintre ele.

Procesul stimulării

După cum am menționat anterior, impulsurile nervoase complete sunt asemănătoare, indiferent de modul în care au fost induse. Deoarece caracterul lor nu este unul strict definit, nefiind lipsit de ambiguități (poate fi privit atât din punct de vedere electric, cât și chimic, vezi anterior), inducerea lor poate fi atribuită alternativ unor cauze electrice sau chimice. Totuși, în cadrul

sistemului nervos, inducerea se datorează mai ales unuia sau mai multor impulsuri nervoase diferite. In astfel de condiții, procesul inducerii - *stimularea* nervoasă - poate să reușească sau nu. Dacă nu reușește, apare inițial o perturbare trecătoare, dar aceasta dispare după câteva milisecunde, astfel că de-a lungul axonului nu ajunge să se propage nicio modificare. Dacă are succes, în foarte scurt timp această perturbare ia o formă (aproape) standard, și în această formă se transmite prin axon. După cum am menționat anterior, acesta va fi un impuls nervos standard, care se va transmite prin axon, iar aspectul lui va fi relativ independent de detaliile procesului care l-a indus.

Stimularea impulsului nervos se produce în mod normal în corpul propriu-zis al celulei nervoase sau în apropierea acestuia. Propagarea lui, așa cum am discutat anterior, se face de-a lungul axonului.

Mecanismul inducerii de impulsuri succesive; caracterul digital al acestuia

Acum pot reveni la caracterul digital al acestui mecanism. Impulsurile nervoase pot fi văzute în mod clar ca niște markeri cu două valori (biți), în sensul discutat anterior: astfel, absența impulsului ar reprezenta o valoare (să spunem, cifra binară 0), iar prezența acestuia ar repre- zenta-o pe cealaltă (să spunem, cifra binară 1). Desigur, acest lucru trebuie interpretat din perspectiva a ceea ce se

petrece într-un singur axon (sau, mai degrabă, la nivelul tuturor axonilor unui anumit neuron) și, eventual, într-o anumită relație de timp față de celelalte evenimente. Apoi urmează a fi interpretat ca un marker (cifra binară 0 sau 1) într-un rol logic specific.

După cum am menționat anterior, impulsurile (care apar în axonii unui neuron dat) sunt de obicei induse de alte impulsuri ce afectează corpul neuronului. De regulă, această stimulare este condiționată, adică doar anumite combinații și sincronizări ale unor astfel de impulsuri primare stimulează producerea impulsului secundar în cauză - toate celelalte nu vor reuși să dea naștere unui > ,

impuls nervos. Adică neuronul este un organ care acceptă și emite anumite entități fizice: impulsurile. Odată cu receptarea impulsurilor electrice în anumite combinații și sincronizări, neuronul va fi stimulat să emită el însusi un impuls electric. în caz contrar, nu va emite. Regulile care descriu tipurile de impulsuri la care va avea el un astfel de răspuns sunt regulile după care funcționează neuronul ca organ activ.

Cu siguranță, aceasta este descrierea modului de funcționare a unei componente dintr-un calculator digital și a felului în care ar trebui caracterizate rolul si functionarea

> >

unei componente digitale. Așa se justifică afirmația

inițială conform căreia sistemul nervos are, la prima vedere, un caracter digital.
Permiteți-mi să adaug câteva cuvinte referitoare la mențiunea „la prima vedere“. Descrierea anterioară conține anumite simplificări și idealizări, care vor fi discutate în continuare. Odată ce se iau în considerare si acestea, caracterul digital nu mai iese în evidență atât de clar și fără echivoc. Chiar și așa, caracteristicile subliniate anterior sunt cele mai evidente. De aceea, mi se pare potrivit să încep discuția, așa cum am facut-o aici, punând accentul pe caracterul digital al sistemului nervos.

Caracteristicile temporale ale răspunsului nervos, oboseala si refacerea

Totuși, înainte de a intra în acest subiect, este cazul să fac anumite remarci orientative referitoare la mărimea, necesitățile energetice și viteza transmiterii impulsului în celula nervoasă. Acestea vor fi deosebit de lămuritoare mai ales atunci când se va face comparația cu principalii competitori „artificiali": componentele active tipice ale dispozitivelor de calcul moderne, adică tubul cu vid și (mai recent) tranzistorul.
Am afirmat anterior că stimularea celulei nervoase are loc în corpul propriu-zis al acesteia sau foarte aproape de ea. De fapt, este posibilă o stimulare perfect normală chiar și de-a lungul axonului. Aceasta înseamnă că un potențial electric adecvat

sau un stimulent chimic potrivit, în concentrație corespunzătoare, atunci când este aplicat într-un punct al axonului, va declanșa în acea locație o perturbare care se va transforma în scurt timp într-un impuls standard ce va călători înainte și înapoi pe axon, pornind de la punctul stimulat. Într-adevăr, tipul „obișnuit" de stimulare descris anterior are loc mai ales pe niște ramificări mai scurte ce pornesc din corpul celulei, care deși au dimensiuni reduse sunt în esență axoni, și se propagă de la acestea către corpul celulei nervoase (și apoi către axonii obișnuiți). De altfel, acești receptori de stimulare se numesc *dendrite.* Stimularea normală, atunci când provine de la un alt impuls (sau impulsuri), este transmisă printr-o terminație specială a axonului (sau axonilor), care propagă impulsul în cauză. Această terminație se numește *sinapsă.* (Nu vom discuta aici dacă impulsul poate stimula doar printr-o sinapsă sau dacă, deplasându-se de-a lungul axonului, poate stimula în mod direct un alt axon aflat extrem de aproape. Aparențele sunt în favoarea presupunerii că este posibil un astfel de proces de tip scurtcircuit.) Timpul unei stimulări transsinaptice este de ordinul a IO^{-4} secunde, fiind definit ca durata dintre sosirea unui impuls la sinapsă și apariția impulsului indus de aceasta în cel mai apropiat punct al unui axon din neuronul stimulat.

Totuși, acesta nu e modul cel mai semnificativ de definire a timpului de reacție al unui neuron, atunci când este privit ca o componentă activă dintr-un dispozitiv de calcul. Motivul este acela că imediat ce impulsul produs a devenit observabil, neuronul stimulat încă nu a revenit la starea inițială, dinaintea stimulării. Acesta este *obosit,* adică nu ar putea să primească imediat o nouă stimulare din partea unui alt impuls și să răspundă la aceasta în modul standard. Din punctul de vedere al funcționării dispozitivului, este important mai degrabă să stabilim timpul după care o stimulare care a indus un răspuns standard poate fi urmată de o altă stimulare, care va produce de asemenea un răspuns standard. Această durată este de circa 1,5 x IO^{-2} secunde. Din aceste cifre este clar că numai unul sau două procente din acest timp sunt necesare pentru stimularea transsinaptică efectivă, restul reprezentând perioada de refacere, în care neuronul revine de la starea lui de oboseală, imediat următoare stării de stimulare, la cea normală, anterioară stimulării. Ar trebui remarcat că această refacere după oboseală este una treptată — la un timp anterior (după circa 0,5 x IO^{-2} secunde), neuronul deja poate răspunde într-un mod nestandardizat, și anume va produce un impuls electric standard, dar numai ca răspuns la un stimul care este în mod semnificativ mai

puternic decât cel necesar în condiții obișnuite. Această stare de fapt are o semnificație oarecum mai largă, la care voi reveni mai târziu.
Astfel, în funcție de felul cum este el definit, timpul de reacție al unui neuron se plasează undeva între IO"^{4} și IO"^{2} secunde, dar cea mai potrivită definiție pentru discuția noastră o reprezintă cea din urmă valoare. In comparație cu aceasta, tranzistorii si tuburile moderne cu vid au timpi de reacție cuprinși între IO"^{6} și IO"^{7} secunde. (Desigur, și aici am în vedere timpul complet de refacere; după acest interval, componenta în discuție se află din nou în starea anterioară stimulării.) Aceasta înseamnă că, din acest punct de vedere, produsele create de noi sunt cu mult înaintea omologilor lor naturali, cu un coeficient de IO^{4} sau 10^{5}.
In ceea ce privește mărimea, problema ia un aspect destul de diferit. Există diverse modalități de a evalua mărimea si > » este mai bine să le luăm în discuție una câte una.

Marimea unui neuron. Comparație cu componentele artificiale

Mărimea liniară a unui neuron variază mult de la o celulă nervoasă la alta, din moment ce unele dintre aceste celule sunt conținute în agregate mari, îndeaproape integrate, și prin urmare au axoni extrem de scurți, pe când altele conduc impulsuri nervoase între părți destul de îndepărtate ale corpului și pot să aibă extensii liniare comparabile cu cele ale întregului corp uman. Un mod de a face

o paralelă reprezentativă și lipsită de ambiguitate este de a compara partea activă din punct de vedere logic a celulei nervoase cu cea a unui tub cu vid sau a unui tranzistor. Pentru prima parte a comparației putem folosi membrana celulară, a cărei grosime este de ordinul a de câteva ori 10^{-5} cm, după cum am menționat anterior. Pentru cea din urmă, lucrurile stau în felul următor: în cazul tubului cu vid, utilizăm distanța dintre grilă și catod, care variază de la 10^{-1} până la de câteva ori IO^{-2} cm; în cazul tranzistorului, distanța dintre așa-numiții „electrozi cu microfila- mente" (electrozii neohmici — „emițătorul" și „electrodul de control"), multiplicată de circa trei ori, pentru a corespunde mediului activ adiacent acestor subcomponente, iar valoarea obținută, cu aproximație, este ceva mai mică de IO^{-2} cm. Astfel, în ceea ce privește dimensiunile liniare, componentele naturale par a se situa în fața celor artificiale, cu un factor de circa 10^{3}.

în continuare, este posibilă o comparație în ceea ce privește volumul. Sistemul nervos central ocupă un spațiu de dimensiunile unui litru (în creier), adică de IO^{3} cm^{3}. Numărul de neuroni conținut în acest sistem este de regulă estimat a fi de ordinul a 10^{10} sau puțin mai mare. Asta ar însemna o valoare de IO^{-7} cm^{3} per neuron.

Poate fi estimată și densitatea care s-ar obține prin comprimarea tuburilor cu vid sau a tranzistorilor —

deși nu cu totul lipsită de ambiguitate. Pare clar că această densitate de comprimare este (de fiecare parte a comparației) o măsură mai bună a eficientei dimensiunii decât volumul >
efectiv al unei singure componente. Cu tehnica din zilele noastre, câteva mii de tuburi cu vid vor ocupa cu siguranță de câteva ori 10^5 cm^3; în cazul tranzistorilor, același lucru se poate obține într-un volum de câteva ori IO^4 cm^3. Utilizând ultima cifră menționată ca măsură a celei mai mari valori care se poate înregistra astăzi, se va obține ceva de genul 10^5 cm^3, pentru câteva mii de componente active, adică între 10 și IO^2 cm^3 per componentă activă. Astfel, componentele naturale le întrec pe cele artificiale în ceea ce privește necesitățile de volum cu factori cuprinși între IO^8 și IO^9.
Comparând aceasta cu valorile estimate pentru dimensiunile liniare, este probabil mai bine să considerăm că factorul dimensiune liniară ocupă aceeași poziție ca rădăcina cubică a factorului volum. Rădăcina cubică >
a primului, între IO^8 și 10^9, este de 0,5 până la 1 ori IO^3. Aceasta vine în perfectă concordanță cu numărul IO^2 la care am ajuns prin metoda directă.

Disiparea energiei. Comparație cu componentele artificiale

In cele din urmă, se poate face o comparație în ceea ce privește consumul de energie. In calitate de organ logic activ, prin natura sa, neuronul nu îndeplinește niciun fel de muncă; impulsul electric

pe care îl produce prin stimulare nu trebuie să aibă mai multă energie decât raportul impulsurilor care stimulează producerea lui - și, oricum, nu există nicio relație intrinsecă si necesară între aceste , >

energii. In consecință, energia implicată este aproape în întregime disipată, adică transformată în căldură, fără a efectua lucru mecanic semnificativ. Ceea ce înseamnă că energia consumată este de fapt energie disipată, iar în cazul acestor organe se poate vorbi foarte bine despre disipare de energie.

Disiparea de energie din sistemul nervos central uman (în creier) este de ordinul a 10 wați. Din moment ce, așa cum am arătat anterior, aici este implicat un număr de neuroni de ordinul a 10^{10}, aceasta înseamnă o disipare de IO^{-9} wați per neuron. Disiparea obișnuită în cazul unui tub cu vid este de ordinul a 5 până la 10 wați. Disiparea obișnuită în cazul unui tranzistor poate fi de ordinul a 10^{-1} wați. Prin urmare, componentele naturale le întrec pe cele artificiale în privința disipării cu factori de ordinul IO^{8} până la IO^{9} - aceiași factori care apar anterior cu referire la necesitățile de volum.

>

Rezumatul comparației

Rezumând toate acestea, se pare că factorul de comparație relevant în ceea ce privește dimensiunea este de circa IO^8 până la IO^9 în favoarea componentelor naturale în raport cu cele artificiale. Acest factor se obține din cubul unei comparații liniare, precum și dintr-o comparare a volumelor și a disipării de energie. Față de acesta există un factor de IO^4 până la IO^5 referitor la viteză, în favoarea componentelor artificiale *versus* cele naturale.Pe baza acestor evaluări cantitative se pot trage anumite concluzii. Desigur, trebuie amintit faptul că discuția este încă într-un stadiu incipient, așadar, concluziile la care s-a ajuns în această etapă trebuie revizuite în funcție de evoluția ulterioară a discuției. Totuși, parcă merită formulate anumite concluzii în acest moment. Acestea sunt după cum urmează.

In primul rând: în ceea ce privește numărul de acțiuni care pot fi realizate de către organe active de aceleași dimensiuni totale (definite de volum sau de disiparea de energie) în același interval, componentele naturale se află cu un factor de IO^4 înaintea celor artificiale. Acesta reprezintă câtul celor doi factori obținuți anterior, adică 10^8 până la IO^9 împărțit la IO^4 până la IO^5.

In al doilea rând: aceiași factori arată că natura se poziționează înaintea componentelor artificiale, folosind componente mai multe, dar mai încete, în vreme ce mediul artificial apelează la un mod de

aranjare opus, cu componente mai puține, dar mai rapide. Astfel, este de așteptat ca o automatizare naturală de mari dimensiuni si eficient ₃ organizată (cum este sistemul nervos central) să aibă tendința de a utiliza cât mai multe elemente logice (sau informaționale) posibil în mod simultan și de a le procesa în același timp, pe când o automatizare artificială mare și eficient organizată (precum un dispozitiv de calcul modern) este mult mai probabil să facă lucrurile succesiv — câte unul, pe rând, sau oricum nu atât de multe în același timp. Cu alte cuvinte, un automat natural mare și eficient este probabil să fie aranjat în mare parte în sistem *paralel,* pe când un automat artificial mare și eficient va avea tendința de a se aranja mai puțin în acest fel și mai degrabă în *serie.* (A se vedea unele remarci anterioare referitoare la aranjamente în serie *versus* aranjamente în paralel.)

In al treilea rând: ar trebui observat, totuși, că operațiile în paralel și în serie nu se pot substitui unele altora fără vreo restricție - cum ar fi necesar pentru ca prima remarcă anterioară să fie complet validă, cu schema ei simplă de împărțire a factorului de avantaj al mărimii cu factorul de dezavantaj al vitezei, pentru a obține un singur „indicator de merit“ (al eficienței). Mai exact, nu tot ceea ce este în serie poate fi imediat paralelizat — anumite operații pot fi realizate numai după efectuarea altora și nu simultan cu acestea (adică

trebuie să folosească rezultatele celor din urmă). Intr-un astfel de caz, tranziția de la o schemă în serie la una în paralel ar putea fi imposibilă sau ar deveni posibilă numai concomitent cu o schimbare în organizarea și abordarea logică a procedurii. Invers, dorința de a transpune în serie o procedură realizată în paralel poate impune automatului de calcul noi cerințe. Mai exact, aceasta va necesita aproape întotdeauna utilizarea de memorie în plus, din moment ce rezultatele operațiilor care sunt efectuate mai întâi trebuie stocate, în timp ce se efectuează operațiile ulterioare. Astfel, este de așteptat ca abordarea logică și structura automatelor logice naturale să difere mult față de cele ale automatelor logice artificiale. De asemenea, este probabil ca necesitățile de memorie ale celor din urmă să se dovedească a fi, în mod sistematic, mult mai mari decât ale primelor. Toate aceste puncte de vedere vor reapărea în discuțiile care vor urma.

Criteriile de stimulare

Cel mai simplu - logica elementara

Acum pot muta discuția către idealizările și simplificările conținute în descrierea acțiunii nervului, pe care am facut-o anterior. Acolo am subliniat existenta acestora si

> > faptul că implicațiile lor nu sunt chiar de neglijat.

Asa cum am remarcat înainte, ieșirea normală a

unui neu- ron este impulsul nervos standard. Apariția acestuia poate fi indusă prin diverse forme de stimulare, inclusiv prin primirea unuia sau a mai multor impulsuri de la alți neuroni. Alți stimuli posibili sunt reprezentați de fenomene din lumea exterioară la care este sensibil un anumit neuron în mod concret (lumină, sunet, presiune, temperatură) și de schimbările fizice și chimice petrecute în organism la locul unde este situat neuronul. Voi începe prin a lua în discuție prima formă de stimulare menționată - cea realizată de către un alt impuls nervos.

Am observat înainte că acest mecanism anume - inducerea impulsurilor nervoase prin combinații specifice ale altor impulsuri nervoase - face ca neuronul să poată fi comparat cu componentele active digitale tipice, elementare. Să ducem mai departe această teorie: dacă un neuron este contactat de către axonii altor doi neuroni (prin intermediul sinapselor acestora) și dacă necesarul lui minim de stimulare (pentru a produce un impuls-răspuns) este de două impulsuri simultane, atunci acel neuron este de fapt o componentă „și“: îndeplinind operația logică de conjuncție (verbalizată prin ,,și“), din moment ce răspunde numai când ambii stimuli sunt activi (în mod simultan). Pe de altă parte, dacă necesarul minim este sosirea a (cel puțin) unui impuls, neuronul este o

componentă „sau“ - adică îndeplinește operația logică de disjuncție (verbalizată prin ,,sau“), din moment ce răspunde când măcar unul dintre cei doi stimuli este activ.

„Și“ și „sau“ sunt operațiile de bază ale logicii. Alături de „nu“ (operația logică a negării), ele reprezintă un set complet de operații logice de bază - toate celelalte operații logice, indiferent cât de complexe, pot fi obținute prin combinații potrivite ale acestora. Nu voi discuta aici modul în care neuronii pot simula și operația „nu“ sau prin ce mijloace poate fi evitată cu totul utilizarea acestei operații. Cele enunțate anterior ar trebui să fie suficiente pentru a face clar ceea ce am subliniat deja, anume faptul că atunci când sunt analizați astfel, neuronii par a fi componente logice de bază - și, prin urmare, și componente digitale de bază.

Criterii de stimulare mai complicate

Totuși, aceasta este o simplificare și o idealizare a realității. De regulă, neuronii reali nu sunt organizați așa de simplu, în ceea ce privește poziția lor în sistem.

Unii neuroni au într-adevăr numai una sau două sinapse - sau, în orice caz, doar câteva, ușor de numărat - cu alti neuroni. Totuși, situația cea mai frecventă este aceea în care corpul propriu-zis al neuronului are sinapse cu axonii altor neuroni.

Apare chiar și situația când mai mulți axoni de la un singur neuron formează sinapse cu un altul. Astfel, sunt posibile multe stimulări, iar tiparele stimulării eficiente au definiții mult mai complicate decât schemele simple „și“ și „sau“ descrise anterior. Dacă există mai multe sinapse pe o singură celulă nervoasă, cea mai simplă regulă de comportament ar fi ca aceasta să răspundă numai când primește un anumit număr minim de impulsuri nervoase (simultane) - sau mai multe. Totuși, ar fi destul de corect să presupunem că în realitate lucrurile pot fi chiar mai complicate decât atât. S-ar putea foarte bine ca o anumită combinație de impulsuri nervoase să stimuleze un neuron dat nu numai prin puterea numărului lor, ci și în virtutea relațiilor spațiale ale sinapselor în care sosesc ele. Aceasta înseamnă că e posibil să apară situații în care să existe, să zicem, sute de sinapse pe o singură celulă nervoasă, iar combinațiile de stimulări eficiente pe acestea (care induc apariția impulsului-răspuns în neuronul dat) sunt caracterizate nu numai prin numărul lor, ci și prin acoperirea unor zone speciale din acel neuron (pe corpul lui sau pe sistemul lui de dendrite, vezi anterior), prin relațiile spațiale ale acestor regiuni și chiar prin relații cantitative și geometrice mai complicate, care ar putea să prezinte importanță.

Pragul

In cazul în care criteriul eficienței stimulării este cel mai simplu dintre cele menționate anterior - prezența (simultană) a unui număr minim de impulsuri stimulatoare -, acest minim necesar de stimulări poartă numele de *prag al stimulării* neuronului în discuție. Se obișnuiește să se vorbească despre necesitățile de stimulare ale unui neuron dat luând în considerare acest criteriu, adică acest prag. Totuși, trebuie să amintim că în niciun caz nu s-a stabilit faptul că necesitățile de stimulare au acest caracter simplu - s-ar putea să aflăm că există relații mult mai complicate decât atingerea unui prag (adică a unui număr minim de stimulări simultane), cum am discutat anterior.

Timpul de însumare

Pe lângă toate acestea, proprietățile unui neuron pot să manifeste și alte elemente de complexitate, care nu pot fi descrise prin simpla relație stimul—răspuns în termenii unui impuls nervos standard. Astfel, deși anterior am adus în discuție termenul „simultaneitate", acesta nu poate să însemne - și nici nu înseamnă - simultaneitate exactă. In fiecare caz există o perioadă finită de grație, un *timp de însumare,* în așa fel încât două impulsuri care sosesc într-o astfel de perioadă continuă să se comporte ca și cum ar fi simultane. De fapt, lucrurile ar putea fi și mai complicate - s-ar putea

ca timpul de însumare să nu fie un concept exact. Chiar și după un interval ceva mai lung, impulsul anterior tot se poate însuma cu impulsul care urmează, într-o măsură parțială, ce descrește treptat; este posibil să existe secvențe de impulsuri (în anumite limite) mai depărtate temporal decât timpul de însumare și care ar putea, în virtutea lungimii lor, să aibă un efect mai mult decât individual; diverse suprapuneri ale fenomenului de oboseală și refacere ar putea să plaseze neuronul în stări anormale, adică în stări în care caracteristicile răspunsului să fie diferite de cele ce apar în condiții standard. In ceea ce privește toate aceste probleme, există anumite observații științifice (mai mult sau mai puțin complete) și toate indică faptul că neuronul individual ar putea fi - cel puțin în situații speciale potrivite - un mecanism mult mai complicat decât se poate exprima prin descrierea dogmatică, în termeni de stimuli-răspuns, care urmărește tiparele simple ale logicii elementare.

Criterii de stimulare pentru receptori

Trebuie spuse numai câteva lucruri (în contextul particular prezent) despre stimularea neuronilor de către alți factori decât semnalele de ieșire (impulsurile nervoase) ale altor neuroni. După cum am discutat mai devreme, astfel de factori sunt fenomenele din lumea exterioară (adică de la suprafața organismului) la care neuronul în

chestiune este în mod particular sensibil (lumină, sunet, presiune, temperatură) și, de asemenea, modificările fizice și chimice din organism, de la locul unde este situat neuronul. Neuronii a căror funcție organizational este să răspundă la prima clasă de stimuli sunt numiți de obicei *receptori.* Totuși, ar fi mai bine să numim toți neuronii a căror menire organizational este să răspundă la alți stimuli decât impulsurile nervoase *receptori* și să facem distincția între prima și a doua categorie, specificând faptul că unii sunt receptori *externi,* pe când ceilalți sunt receptori *interni.*

Luând în considerare toate aceste lucruri, apare din nou problema unui criteriu de stimulare - criteriu ce definește condițiile care au drept efect producerea unui impuls nervos.

Cel mai simplu criteriu de stimulare este, din nou, unul care poate fi exprimat prin ideea unui *prag* - exact cum s-a întâmplat în cazul discutat anterior, al stimulării unui neuron de către un impuls nervos. Aceasta înseamnă că un criteriu al eficienței stimulării poate fi exprimat în termenii unei intensități minime a agentului stimulator - adică o intensitate minimă a luminii, a energiei sonice (cuprinsă într-un anumit interval de frecvență), a suprapresiunii, a creșterii temperaturii în cazul unui receptor extern; sau a unei schimbări minime a concentrației unui agent chimic ori a valorii unor parametri fizici în cazul

unui receptor intern.
Totuși, ar trebui notat că acest criteriu de stimulare de tip prag nu este singurul posibil. Astfel, în cazul optic, se pare că mulți dintre neuronii implicați răspund la o schimbare în iluminare (în unele cazuri, de la lumină la întuneric, în altele, de la întuneric la lumină) mai degrabă decât la atingerea unui anumit nivel specific de iluminare. S-ar putea ca acestea să nu fie reacții ale unui singur neuron, ci rezultatul neuronal al unor sisteme neuronale mai complicate. Nu voi intra în mai multe amănunte. Este de ajuns să observăm că dovezile pe care le avem la îndemână tind să indice faptul că, și în cazul receptorilor, criteriul de stimulare de tip prag nu este singurul utilizat în cadrul sistemului nervos.
Așadar, permiteți-mi să repet exemplul tipic menționat anterior. Este bine cunoscut faptul că, în nervul optic, anumite fibre nu răspund la orice nivel (minim) de iluminare, ci doar la schimbări ale acestui nivel, adică, în anumite fibre, răspunsul este cauzat de trecerea de la întuneric la lumină, iar în altele, de trecerea de la lumină la întuneric. Cu alte cuvinte, creșterea sau descreșterea nivelului în discuție, adică mărimea derivatei, și nu propria mărime, este cea care furnizează criteriul stimulării.
Acum ar fi potrivit să spun câteva cuvinte despre

rolul acestor „complexități" ale sistemului nervos în structura lui funcțională și în activitatea lui. In primul rând, este destul de credibilă ipoteza conform căreia aceste complexități nu au vreun rol functional. Totuși, ar fi mai inte- resant să scoatem în evidență faptul că e posibil ca ele să aibă astfel de roluri și să spunem câteva lucruri despre aceste posibilități.

E posibil ca în sistemul nervos organizat în esență digital, elementele de complexitate la care ne-am referit să joace un rol analogic sau măcar „mixt". S-a sugerat ideea conform căreia, prin astfel de mecanisme, efecte generale mai obscure ar putea să influențeze funcționarea sistemului nervos. Este posibil ca, în acest mod, anumite potențiale electrice generale să joace un rol important și ca sistemul să răspundă per total soluțiilor la problemele teoretice potențiale, care nu sunt atât de simple și elementare ca cele descrise în mod normal prin criteriul digital, criteriul de stimulare etc. Totuși, deoarece caracterul sistemu- lui nervos este probabil în primul rând digital, astfel de efecte, dacă ar fi reale, ar interacționa probabil cu efectele digitale, adică s-ar pune mai degrabă problema unui „sistem mixt" decât a unuia autentic analogic. Diverși autori au făcut speculații în aceste direcții; mi se pare corect să-i menționez și pe ei, când fac referire la literatura de specialitate. Dar nu voi intra aici în detalii despre ei.

Totuși, în privința estimării numărului de componente active pe care am facut-o până acum, ar trebui spus că toate complicațiile de acest tip înseamnă că o celulă nervoasă reprezintă mai mult decât o singură componentă activă de bază si că orice încercare semnificativă de numă- »
rare trebuie să ia în considerare si acest lucru. Evident, chiar și criteriile de stimulare mai complicate au același efect. In cazul în care celula nervoasă este activată de stimularea unei anumite combinații de sinapse de pe corpul ei si nu de altele, atunci o evaluare eficientă a numărului componentelor active de bază ar trebui să fie mai degrabă o numărare a sinapselor decât a celulelor nervoase. Dacă situația se complică suplimentar cu apariția fenomenelor „mixte“ la care m-am referit anterior, atunci numărătoarea aceasta devine si mai dificilă. Necesitatea de a înlocui numărarea celulelor nervoase cu numărarea sinapselor ar putea crește valoarea cifrei componentelor active de bază cu un factor considerabil, cum ar fi 10 sau 100. Acest lucru, dar si circumstanțele similare ar trebui avute în vedere atunci când vine vorba despre evaluarea numărului componentelor active de bază la care ne-am referit până acum.

Astfel, toate elementele de complexitate despre care am vorbit aici ar putea fi irelevante, dar ar putea și să doteze sistemul cu un caracter (parțial) analogic sau cu un caracter „mixt“. Oricum, ele

cresc numărul de componente active de bază, dacă evaluarea numărului acestora trebuie efectuată conform criteriilor semnificative. Această cres- tere ar trebui să se realizeze cu un factor de ordinul 10 sau 100

.Problema memoriei în cadrul sistemului nervos

Discuțiile de până acum nu au luat în considerare o componentă a cărei prezență în interiorul sistemului nervos este extrem de plauzibilă, poate chiar sigură - dacă nu din alt motiv, măcar din acela că a jucat un rol vital în toate dispozitivele de calcul artificiale construite până acum, de aceea, importanța ei este mai degrabă o problemă de principiu decât un accident. Mă refer la *memorie.* Așadar, mă voi ocupa acum de discutarea acestei componente sau, mai bine spus, a acestui subansamblu al sistemului nervos.

După cum am afirmat anterior, prezența memoriei - ori, deloc improbabil, a mai multor memorii - în sistemul nervos este o chestiune de presupunere și de postulare, dar una pe care toate experiențele noastre cu automatele de calcul artificiale o sugerează și o confirmă. De asemenea, trebuie să recunoaștem chiar de la început că toate afirmațiile fizice care se leagă de natura, întruchiparea și loca- lizarea acestui subansamblu sau a acestor subansambluri sunt, în egală măsură, ipotetice. Din punct de vedere fizic, nu știm unde anume în

sistemul nervos se află memoria, nu știm dacă este un organ separat sau e compusă din mai multe părți specifice ale altor organe deja cunoscute etc. E foarte posibil să se găsească într-un sistem format din anumiti nervi, ceea ce înseamnă că ar trebui să fie destul de mare. Este de asemenea posibil să aibă legătură cu mecanismul genetic al corpului. In privința naturii și poziției memoriei suntem la fel de neștiutori ca grecii, care bănuiau că aceasta se află în diafragmă. Singurul lucru pe care îl știm despre ea este că ar trebui să fie o memorie cu o capacitate relativ mare și că e greu de imaginat cum un automat natural atât de complex ca sistemul nervos uman ar putea funcționa fără așa ceva.

Principii pentru estimarea capacității memoriei în sistemul nervos

Permiteți-mi acum să spun câteva cuvinte despre capacitatea probabilă a acestei memorii.

In automatele artificiale, precum dispozitivele de calcul, există metode standard, acceptate de toată lumea, de a atribui memoriei o „capacitate[44] și ar părea rezonabil să le extindem pe acestea și la nivelul sistemului nervos. O memorie poate reține o anumită cantitate maximă de informație, iar informația poate fi întotdeauna transformată într-o agregare de cifre binare, „biți[44]. Astfel, unei memorii care poate reține o mie de numere zecimale cu opt cifre ar trebui să îi fie alocată o

capacitate de 1 000 x 8 x 3,32 biți, știut fiind faptul că o cifră zecimală este aproximativ echivalentă cu $\log_2 10$ - 3,32 biți (explicațiile pentru o astfel de estimare au fost stabilite în lucrări clasice de teorie a informației de către G.E. Shannon si > » alții). Intr-adevăr, este clar că trei cifre zecimale trebuie să fie echivalente cu aproximativ 10 biți, din moment ce 2^{10} = 1 024 este aproximativ egal cu 10^3 = 1 000. (In acest mod, o cifră zecimală corespunde, aproximativ, cu 10/3 - 3,33 biți.) Astfel, prin calcularea capacității descrise anterior, obținem rezultatul de 2,66 x IO^4 biți. Printr-o argumentare similară, volumul de informație dintr-un caracter al alfabetului folosit în imprimante sau în mașinile de scris - un astfel de caracter reprezentând una dintre 2 x 26 + 36 = 88 de modalități (2 reprezintă posibilitatea de scriere cu majuscule sau cu litere mici, 26 - numărul de litere din alfabet, iar 36 - numărul obișnuit de semne de punctuație, simboluri numerice și intervale care sunt, de asemenea, relevante în acest context) — trebuie să fie evaluat la $\log_9 88$ - 6,45. Astfel, o memorie care poate reține 1 000 de astfel de caractere are o capacitate de 6450 = 6,45 x IO^3 biți. In aceeași ordine de idei, capacitățile de memorie corespunzătoare unor tipuri mai complicate de informație, cum ar fi formele geometrice (desigur, date cu un anumit grad de precizie și rezoluție), nuanțele culorilor (cu aceleași calități precizate anterior) și altele, pot fi de asemenea exprimate în unități standard, adică în biți.

Memoriilor care pot reține combinațiile tuturor acestor informații li se pot atribui capacități ce rezultă din cele la care s-a ajuns conform principiilor enunțate anterior, pur și simplu prin adunare.

Estimări ale capacității memoriei în baza acestor stipulâri

Capacitatea de memorie necesară pentru un dispozitiv de calcul modern este de regulă de ordinul a IO^5 până la IO^6 biți. Capacitățile de memorie care se presupune că sunt necesare funcționării sistemului nervos ar trebui să fie cu > mult mai mari, din moment ce sistemul nervos, asa cum * * > s-a văzut anterior, trebuie considerat un automat de calcul mult mai mare decât automatele de calcul artificiale (cu alte cuvinte, calculatoarele) pe care le cunoaștem. Este greu de spus cu cât ar trebui să depășească memoria presupusă numărul citat anterior, de IO^5 până la IO^6. Totuși, se poate ajunge la anumite estimări orientative, brute.

Astfel, receptorul standard pare să accepte circa 14 imprimări digitale distincte pe secundă, cifră care probabil poate fi considerată echivalentă cu același număr de biți. Dacă avem IO^{10} celule nervoase și presupunem că fiecare dintre ele este în condiții potrivite un receptor (intern sau extern), apare drept rezultat un volum total de informație de intrare de 14 x IO^{10} biți pe secundă.

Presupunând mai departe (fapt pentru care există niște dovezi) că nimic nu se uită cu adevărat în cadrul sistemului nervos — că imprimările odată realizate pot fi îndepărtate din zona principală a activității nervoase, adică din centrul atenției, dar nu pot fi cu adevărat șterse -, se poate face o estimare pentru o întreagă viață de om. Dacă luăm în discuție o viață de 60 de ani - 2 x IO^9 secunde pentru informația de intrare de pe parcursul întregii vieți, cu stipulările descrise anterior, capacitatea totală de memorare necesară s-ar dovedi a fi 14 x IO^{10} x 2 x IO^9 = 2,8 x IO^{20} biți. Acest număr este mai mare decât cifra IO^5 până la IO^6, care e recunoscută ca potrivită pentru un dispozitiv de calcul modern, dar diferența dintre respectivul număr și echivalentul lui în cazul dispozitivelor de calcul nu ar părea să depășească excesiv de mult diferența dintre numărul de componente active de bază pe care am observat-o anterior.

Diverse posibile materializări fizice ale memoriei

Problema manifestării fizice a acestei memorii rămâne în picioare. Pentru aceasta, diverși autori au sugerat un număr variat de soluții. S-a exprimat presupunerea că pragurile de stimulare - sau, mai pe larg spus, criteriile de stimulare — pentru diverse celule nervoase se modifică în timp în funcție de istoria anterioară a celulei respective. Astfel, utilizarea frecventă a unei celule nervoase îi

poate scădea acesteia pragul de stimulare, adică poate face ca stimularea să-i devină mai ușoară - si altele asemenea. Dacă
> >
acest lucru ar fi adevărat, memoria ar ține de variabilitatea criteriilor de stimulare. Aceasta este cu siguranță o posibilitate, dar nu voi încerca să o discut aici.

O expresie și mai drastică a acestei idei ar putea fi obținută din presupunerea că înseși conexiunile celulei nervoase, adică distribuția axonilor care conduc impulsul, variază în timp. Aceasta înseamnă că ar putea să existe următoarea stare de lucruri. Este ipotetic posibil ca neutilizarea îndelungată a unui axon să îl facă pe acesta inutil pentru o utilizare ulterioară. Pe de altă parte, o utilizare prea frecventă (mai frecventă decât cea obișnuită) ar putea să scadă pragul de stimulare a conexiunii pe care o reprezintă (ducând la un criteriu mai facil de stimulare) pe calea respectivă. In acest caz, din nou, anumite părți ale sistemului nervos ar fi variabile în timp și ar avea un istoric, ajungând astfel prin ele însele să reprezinte o memorie.

O altă formă de memorie prezentă în mod evident o constituie partea organismului care ține de genetică: cromozomii și genele care îi alcătuiesc sunt în mod clar elemente de memorie, care prin starea lor afectează și, într-o anumită măsură, determină funcționarea întregului sistem. Astfel,

există și posibilitatea unui sistem de memorie genetic.

Mai pot exista și alte forme de memorie, iar unele dintre ele par destul de plauzibile. Anumite trăsături ale compoziției chimice din unele zone ale organismului ar putea să se autoperpetueze și să facă astfel posibilă existența unor elemente de memorie. Deci ar trebui luate în considerare astfel de tipuri de memorie atunci când se discută despre sistemul de memorie genetic, din moment ce însușirile autoperpetuante din gene se pare că se pot localiza și în afara genelor, în zonele din celulă rămase.

Nu voi intra în amănunte referitor la toate aceste posibilități și nici la altele care ar putea fi luate în considerare drept la fel de plauzibile - sau, în unele cazuri, chiar mai plauzibile. Mă limitez doar la remarca potrivit căreia, chiar fără a localiza memoria în grupuri specifice de celule nervoase, se poate sugera (și, într-adevăr, s-a și sugerat deja) o mare varietate de manifestări fizice ale acesteia cu diverse grade de plauzibilitate.

Analogie cu dispozitivele de calcul artificiale

In cele din urmă, mi-ar plăcea să menționez că și anumite sisteme de celule nervoase, care se stimulează unele pe altele în diferite moduri ciclice, constituie tipuri de memorie. Aceste tipuri ar fi alcătuite din elemente active (celule

nervoase). In tehnologia pe care o întrebuințăm la dispozitivele de calcul, astfel de tipuri de memorie sunt folosite în mod frecvent și semnificativ; de fapt, acestea au fost primele care au apărut. In dispozitivele de calcul pe bază de tuburi cu vid, așa-numitele circuite „flip-flop“ sau de tip bistabil, adică perechi de tuburi cu vid care se urmăresc și se controlează reciproc, reprezintă acest tip de memorie. Tehnologia tranzistorilor, la fel ca orice altă formă de tehnologie electronică de mare viteză, permite și solicită utilizarea unor subansambluri de tip bistabil, acestea putând fi folosite ca elemente de memorie la fel cum se foloseau componentele „flip-flop“ în primele dispozitive de calcul pe bază de tuburi cu vid.

Componentele de baza ole memoriei nu trebuie so fie neapărat identice cu componentele active de baza

Totuși, trebuie remarcat că aprioric este puțin probabil ca sistemul nervos să folosească astfel de componente ca suporturi principale pentru necesitățile sale de memorie; astfel de memorii, denumite în general „memorii compuse din componente active de bază“, sunt extrem de costisitoare, din toate punctele semnificative de vedere. Tehnologia dispozitivelor de calcul moderne a început cu asemenea aranjamente - astfel, primul mare dispozitiv de calcul cu tuburi cu vid, ENIAC, se baza exclusiv pe componente de tip bistabil pentru memoria ei de bază (adică cea mai

rapidă și cea mai accesibilă). Totuși, ENIAC avea o mărime considerabilă (22000 de tuburi cu vid) și o capacitate de memorie primară extrem de mică (constând doar din câteva zeci de numere zecimale cu zece cifre), conform standardelor din ziua de astăzi. A se remarca faptul că această cantitate înseamnă ceva de ordinul a câteva sute de biți - cu siguranță, mai puțin de IO^3. In calculatoarele utilizate acum, echilibrul potrivit între dimensiunea calculatorului și capacitatea memoriei lui (vezi anterior) ajunge în general la valori de IO^4 elemente active de bază pentru o capacitate de memorie de 10^5 până la 10^6 biți. Acest lucru se obține utilizând forme de memorie care sunt cu totul diferite din punct de vedere tehnologic de componentele active de bază ale calculatorului. Astfel, un dispozitiv de calcul pe bază d

etuburi cu vid sau de tranzistori poate avea o memorie care funcționează intr-un sistem electrostatic (un tub catodic) sau în agregate mari de miezuri feromagnetice aranjate potrivit. Nu voi încerca să fac aici o clasificare completă, din moment ce alte forme importante de memorie, cum ar fi cea de tipul întârzierii acustice, cea de tip feroelectric sau cea a întârzierii magnetostrictive (iar lista e posibil să crească), nu ar putea fi încadrate atât de ușor în astfel de clasificări. Vreau numai să evidențiez ideea conform căreia > componentele utilizate în cadrul memoriei pot fi cu totul diferite de cele ce alcătuiesc componentele active de bază.

Aceste aspecte ale problemei par a fi extrem de importante pentru înțelegerea structurii sistemului nervos și se pare că până acum au rămas, în cea mai mare parte, fără răspuns. Cunoaștem componentele active de bază ale sistemului nervos (celulele nervoase). Avem toate motivele să credem că acestui sistem îi este asociată o capacitate de memorie extrem de mare. Insă trebuie să subliniem că *nu* cunoaștem ce fel de entități fizice reprezintă componentele de bază ale memoriei în cauză.

Părți analogice și digitale din cadrul sistemului nervos

După ce anterior am scos în evidență problemele profunde, fundamentale și nerezolvate referitoare la aspectul memoriei sistemului nervos, ar fi

potrivit să trecem la alte chestiuni. Totuși, mai există un aspect minor legat de subansamblul necunoscut al memoriei din cadrul sistemului nervos, despre care se cuvine să spunem câteva lucruri. Este vorba despre relația dintre părțile analogice și cele digitale (sau ,,mixte“) ale sistemului nervos. In cele ce urmează, le voi dedica o discuție suplimentară, scurtă și incompletă, după care voi continua cu probleme care *nu* au legătură cu memoria.

Observația pe care doresc să o fac este următoarea: așa cum am scos în evidență anterior, procesele care trec prin sistemul nervos ar putea să își schimbe caracterul, de la digital la analogic și din nou la digital, și așa mai departe, în mod repetat. Impulsurile nervoase, adică partea digitală a mecanismului, ar putea controla un anumit studiu al unui astfel de proces, de exemplu, contracția unui mușchi sau secreția unei substanțe chimice. Acest fenomen aparține clasei de fenomene analogice, dar ar putea sta la originea unei serii de impulsuri nervoase care se datorează faptului că a fost perceput de receptori interni potriviți. Atunci când sunt generate astfel de impulsuri nervoase, revenim în linia de acțiune digitală. Cum am menționat anterior, astfel de schimbări, de la un proces digital la unul analogic și din nou la unul digital, ar putea să se succeadă de câteva ori. In

acest mod, părțile sistemului reprezentate de impulsul nervos, care este digital, și cele ce implică schimbări chimice sau modificări mecanice datorate contracțiilor musculare, care sunt de tip analogic, ar putea, prin alternarea lor, să confere oricărui proces un caracter mixt.

Rolul mecanismului genetic în contextul menționat anterior J

In acest context, fenomenul genetic joacă un rol tipic. Genele sunt categoric părți ale sistemului de componente digitale. Totuși, efectul lor este de stimulare a formării de substanțe chimice dedicate, mai exact, de enzime specifice, caracteristice genelor implicate și aparținând astfel zonei analogice. Deci în acest domeniu se observă o instanță specifică a alternării dintre analogic și digital, cu alte cuvinte vorbim despre un membru al unei clase mai largi, la care m-am referit anterior într-un mod mai general.

Codurile si rolul lor în controlarea funcționarii unui dispozitiv de calcul

Permiteți-mi acum să trec la probleme care implică alte aspecte decât cele legate de memorie. Mă refer aici la anumite principii de organizare a comenzilor logice, care au o importanță considerabilă în funcționarea oricărui automat de calcul mai complicat.

Mai întâi, dati-mi voie să introduc un termen

necesar în contextul prezent. Un sistem de instrucțiuni logice pe care îl poate urma un automat și care face ca acel automat să îndeplinească anumite sarcini organizate se numește *cod.* Prin comenzi logice înțeleg lucruri precum impulsurile nervoase care apar pe axoni potriviți — și, de fapt, orice element care face ca un sistem logic digital, cum este sistemul nervos, să funcționeze intr-o manieră reproductibilă și pragmatică.

Conceptul de cod complet

Discutând despre coduri, următoarea distincție devine imediat evidentă. Un cod poate fi *complet* - adică, folosind terminologia impulsurilor nervoase, poate fi specificată succesiunea în care iau naștere aceste impulsuri și axonii pe care apar. Desigur, acest lucru va defini în întregime un comportament specific al sistemului nervos sau, în comparația anterioară, al automatului artificial corespunzător care este implicat într-o astfel de situație. In cazul dispozitivelor de calcul, astfel de coduri complete sunt seturi de comenzi date împreună cu toate specificațiile necesare. Dacă dispozitivul are de rezolvat prin calcule o problemă anume, el trebuie controlat în acest sens prin- tr-un cod complet. Utilizarea calculatoarelor moderne se bazează pe capacitatea utilizatorului de a dezvolta și formula codurile complete necesare pentru orice problemă pe care ar trebui să o rezolve calculatorul

respectiv.

Conceptul de cod scurt

In opoziție cu codurile complete, există o altă categorie de coduri, catalogate drept *coduri scurte.* Acestea se bazează pe ideea care urmează.

Logicianul englez A.M. Turing a demonstrat în 1937 (și de atunci diverși experți în dispozitive de calcul au pus în practică aceste idei în diverse moduri) că este posibil să se dezvolte sisteme de coduri cu instrucțiuni pentru un dispozitiv de calcul care să îl facă să se comporte ca și cum ar fi un alt dispozitiv de calcul specificat. Astfel de sisteme de instrucțiuni, care fac ca un calculator să *imite* comportamentul altuia, sunt numite *coduri scurte.*

Permiteti-mi să intru ceva mai mult în detaliu referitor la *y*
problemele tipice ale utilizării și dezvoltării unor astfel de coduri scurte.

După cum am arătat anterior, un dispozitiv de calcul este controlat de coduri, secvențe de simboluri - de regulă, simboluri binare -, adică șiruri de biți. In orice set de instrucțiuni care guvernează utilizarea unui dispozitiv de calcul trebuie specificate extrem de clar care șiruri de biți constituie comenzi și ce ar trebui să determine dispozitivul să facă.

Pentru două dispozitive diferite, aceste șiruri *semnificative* de biți nu trebuie să fie identice si, oricum, efectele lor asupra funcționării dispozitivelor corespunzătoare pot fi complet

diferite. Astfel, dacă unui dispozitiv i se dă un set de comenzi specifice altuia, acestea vor fi probabil niște *nonsensuri* pentru primul dispozitiv, cel puțin parțial, adică niște șiruri de biți care nu aparțin toate familiei de șiruri *semnificative* (în termenii primului dispozitiv menționat). Dacă ar fi „ascultate[44] de primul dispozitiv, comenzile l-ar face pe acesta să acționeze în moduri care nu fac parte din planul organizat ce stă la baza soluției unei probleme, la care se dorește să se ajungă. Vorbind la modul general, comenzile nu îl vor face pe primul dispozitiv menționat să se comporte în mod intenționat spre soluționarea unei sarcini vizualizate și organizate, adică spre rezolvarea unei anumite probleme.

Funcționarea unui cod scurt

Un cod care, conform schemei lui Turing, se presupune că ar trebui să determine un dispozitiv de calcul să se comporte ca și cum ar fi un altul anume (ceea ce ar însemna că primul va fi determinat să îl *imite* pe cel de-al doilea) se impune să facă următoarele lucruri. Trebuie să conțină, în termeni pe care dispozitivul îi va înțelege (și îi va asculta), instrucțiuni (părți detaliate ale codului) care vor face dispozitivul să examineze fiecare ordin pe care îl va primi și să stabilească dacă acest ordin are structura potrivită unei comenzi a celui de-al doilea dispozitiv. Apoi, trebuie să conțină, în termenii sistemului de comenzi al

primului dispozitiv, suficiente ordine pentru a determina dispozitivul să facă anumite acțiuni pe care le-ar fi făcut și cel de-al doilea dispozitiv sub influența ordinului în cauză.
Rezultatul important al ideii lui Turing este că, în acest fel, primul dispozitiv poate fi determinat să imite comportamentul *oricărui* alt dispozitiv. Structura de comenzi pe care este determinat să o urmeze ar putea fi cu totul diferită de cea caracteristică primului dispozitiv implicat.
Astfel, structura de ordine la care se face referire poate să aibă de-a face cu comenzi cu un caracter mult mai complex decât cele caracteristice primului dispozitiv: fiecare dintre aceste comenzi individuale ale celui de-al doilea dispozitiv ar putea să implice execuția a multiple operații de către primul dispozitiv menționat. Poate implica procese complicate, iterative, acțiuni multiple de orice fel; în general, orice lucru pe care îl poate face primul dispozitiv de calcul în orice perioadă de timp și sub controlul oricărui sistem de ordine posibil, cu orice grad de complexitate, ar putea fi efectuat acum ca și cum ar fi implicate numai acțiuni „elementarei comenzi de bază, primare, necombinate.
Motivul pentru care un astfel de cod secundar e numit *cod scurt* este unul istoric: aceste coduri scurte au fost dezvoltate ca elemente de sprijin pentru scrierea de cod (numită și ,,codare“), adică au rezultat din dorința de a face posibilă scrierea

unui cod mai scurt pentru un dispozitiv decât ar fi permis propriul lui sistem natural de comenzi, tratând dispozitivul ca și cum ar fi fost un altul, cu un sistem de comenzi mai convenabil, mai aproape de a fi complet și care ar fi permis codări mai simple, mai puțin circumstanțiale si mai directe.

Structura logicâ a sistemului nervos

In acest moment, ar fi mai bine să redirectionăm discuția *către* un alt complex de întrebări. După cum am arătat anterior, acestea nu au legătură cu problema memoriei sau cu chestiunile legate de codurile complete ori de cele scurte, pe care tocmai le-am discutat. Ele se referă la rolurile aritmeticii și logicii în funcționarea oricărui automat de calcul complicat și, în mod special, a sistemului nervos.

Importanța procedurilor numerice

Ideea implicată aici, una de o importanță capitală, este următoarea. Orice automat artificial care a fost construit pentru uz uman și în special pentru gestionarea unor procese complicate posedă în mod normal o parte pur logică și o parte aritmetică, adică o parte în care procesele aritmetice nu joacă niciun rol și una în care sunt importante. Acest lucru se datorează faptului că, având în vedere obiceiul nostru de a gândi și de a

ne exprima gândurile, este extrem de dificil să redăm o situație cu adevărat complicată fără a recurge la formule și numere.

Astfel, un automat care trebuie să controleze probleme cum ar fi stabilitatea temperaturii, a anumitor presiuni sau a echilibrului chimic din corpul uman va avea acele sarcini definite prin egalități și inegalități numerice atunci când respectivele sarcini sunt definite de către un operator uman.

Interacțiunea procedurilor numerice cu logica

Pe de altă parte, există multe porțiuni ale acestei sarcini care pot fi formulate fără referiri la relațiile numerice, adică în termeni pur logici. Astfel, anumite principii calitative care implică răspunsuri sau non-răspunsuri filozofice pot fi enunțate fără a se recurge la numere, pur și simplu afirmând în mod calitativ în ce combinații de circumstanțe » , vor avea loc anumite evenimente si în ce combinații nu ? ?
sunt dorite acestea.

Motive pentru care ne așteptam la cerințe de înalta precizie

Aceste remarci arată că sistemul nervos, atunci când este văzut ca un automat de calcul, trebuie în mod clar să aibă atât o parte aritmetică, cât și una logică, și că necesitățile lui aritmetice sunt la fel de mari precum cele logice. Asta înseamnă că avem din nou de-a face cu un dispozitiv de calcul în adevăratul sens al cuvântului, asa că se cere aici o

discuție în termenii conceptelor familiare teoriei automatelor de calcul.
Având în vedere acest lucru, se pune pe loc următoarea întrebare: atunci când privim sistemul nervos ca pe un automat de calcul, cu ce precizie ar fi de așteptat să funcționeze partea aritmetică? Această problemă este una extrem de importantă din următorul motiv: toate experiențele avute cu dispozitivele de calcul demonstrează că, dacă un asemenea dispozitiv trebuie să se ocupe de sarcini aritmetice la fel de complicate precum cele pe care le rezolvă sistemul nervos, este necesar ca acesta să fie dotat cu niveluri relativ ridicate de precizie. Motivul este acela că respectivele sarcini aritmetice - calculele - pot fi foarte lungi, iar în timpul unor calcule lungi erorile nu numai că se adună, dar cele produse în etapele inițiale ale calculului sunt amplificate în etapele lui ulterioare; de aceea, este nevoie de o precizie considerabil mai mare decât pare să necesite natura fizică a problemei. Astfel, ar fi de așteptat ca partea aritmetică a sistemului nervos să existe, iar dacă acest sistem este văzut ca un dispozitiv de calcul, e de presupus că trebuie să opereze cu o precizie considerabilă. In cazul automatelor de calcul artificiale cunoscute, având în vedere si condițiile de com- plexitate implicate în această situație, o precizie de zece sau de douăsprezece zecimale nu ar fi deloc exagerată.

Această concluzie a meritat tot efortul si aceasta numai datorită, mai degrabă decât în ciuda, faptului că nu este absolut deloc plauzibilă.

Natura sistemului de notatii „ implicate: nu digital, ci statistic

După cum am arătat anterior, știm anumite lucruri despre modul în care sistemul nervos transmite informații numerice. De regulă, acestea sunt transmise prin șiruri periodice - sau aproape periodice - de impulsuri. Un stimul intens care acționează asupra unui receptor îl va face pe acesta să răspundă imediat ce va fi depășită perioada lui refractară absolută. Un stimul mai slab îl va face să răspundă de asemenea într-un mod periodic sau aproape periodic, dar cu o frecvență oarecum mai scăzută, ținând cont de faptul că va trebui depășită nu doar perioada refractară absolută, ci și o anume perioadă refractară relativă, înainte ca fiecare răspuns următor să devină posibil. In consecință, intensitățile stimulilor cantitativi sunt redate prin șiruri de impulsuri periodice sau aproape periodice, frecvența fiind întotdeauna o funcție monotonă a intensității stimulului. Acesta este un fel de sistem » de semnalizare cu frecventă modulată; intensitățile sunt traduse în frecvențe. Această proprietate a fost observată în mod direct în cazul anumitor fibre ale nervului optic, precum și în cazul nervilor care transmit informații referitoare la presiuni (importante).

Merită remarcat faptul că frecvența în cauză nu este direct egală cu orice intensitate a stimulului, ci mai degrabă reprezintă o funcție monotonă a acestuia din urmă. Acest lucru permite introducerea a diverse tipuri de efecte de scalare și de exprimare a preciziei în termeni care depind de scalările folosite în mod convenabil si favorabil.
Ar trebui observat că frecventele în discuție se află de regulă în intervalul 50—200 de impulsuri pe secundă.
In mod evident, în aceste condiții, precizii precum cele menționate anterior (de 10 până la 12 zecimale!) ies cu totul din discuție. Sistemul nervos este un dispozitiv de calcul care reușește să-și facă treaba - deosebit de complicată - bazându-se pe un nivel de precizie relativ scăzut: conform celor prezentate anterior, sunt posibile niveluri de precizie de numai două, trei zecimale. Acest fapt trebuie subliniat iar si iar, deoarece niciun calculator artificial cunoscut nu poate opera în mod previzibil și semnificativ pe baza unei precizii atât de scăzute.
Ar mai trebui remarcat un lucru. Sistemul descris anterior nu duce doar la un nivel scăzut de precizie, ci și la un nivel destul de mare de încredere. Intr-adevăr, dacă într-un sistem digital de notații lipsește un singur impuls, din acest fapt ar putea rezulta modificarea absolută a sensului, adică un nonsens. Pe de altă parte, este clar că

dacă dintr-o schemă de tipul descris anterior se pierd unul sau chiar mai multe impulsuri - sau se inserează impulsuri în mod inutil, din greșeală -, frecvența relevantă, adică sensul mesajului, este distorsionată doar într-un mod neesențial.
Acum se pune o întrebare pentru care trebuie găsit un răspuns semnificativ: ce deducții esențiale legate de structura aritmetică și logică a dispozitivului de calcul reprezentat de către sistemul nervos pot fi extrase din aceste observații aparent conflictuale?

Deteriorarea aritmetica. Rolurile adâncimilor aritmetice și logice

Pentru oricine a studiat deteriorarea preciziei pe parcursul unui calcul lung, răspunsul este clar. După cum am scos în evidentă mai înainte, această deteriorare este rezultatul *acumulării* de erori prin suprapunerea, ba chiar mai mult, prin *amplificarea* erorilor comise la începutul calculului, prin manipulări venite din părțile ulterioare ale calculului; cu alte cuvinte, este rezultatul numărului considerabil de operații aritmetice care trebuie efectuate în serie, sau altfel spus, rezultatul marii *adâncimi aritmetice* a schemei.
Faptul că există mai multe operații care trebuie efectuate în serie este, desigur, o caracteristică atât a structurii logice a schemei, cât și a celei aritmetice. Prin urmare, este potrivit să spunem că toate aceste fenomene de deteriorare a preciziei

sunt rezultatul marii *adâncimi logice* a schemei cu care avem de-a face aici.

Precizie aritmetica sau siguranța logica, alternative

De asemenea, trebuie remarcat faptul că sistemul de mesaje folosit în cadrul sistemului nervos, așa cum a fost el descris anterior, are un caracter în primul rând *statistic,* cu alte cuvinte, ceea ce contează nu sunt pozițiile precise ale markerilor (cifrelor), ci caracteristica statistică a apariției lor, adică frecvențele șirurilor de pulsuri periodice sau aproape periodice etc.

Astfel, sistemul nervos se pare că folosește un tip de notarii cu totul diferit fată de cele familiare aritmeticii si > > > matematicii obișnuite: în locul unui sistem precis de marker! în care poziția - și prezența sau absența - fiecăruia în parte contează esențial în determinarea sensului mesajului, avem aici un ansamblu de notații în care înțelesul este transmis prin proprietățile *statistice* ale mesajului. Am văzut cum acest lucru duce la un nivel mai scăzut de precizie aritmetică, dar la un nivel mai înalt de siguranță logică: o deteriorare de aritmetică a fost compensată de o îmbunătățire de logică.

A/te *trasaturi statistice ale sistemului de mesaje care ar putea fi folosit*

Acest context cere în mod clar punerea unei noi întrebări. In cazul expus anterior, frecvența anumitor șiruri de impulsuri periodice sau aproape periodice ducea *mesajul,* adică *informația.* Aceasta

era o trăsătură *statistica* distinctă a mesajului. Oare există și alte proprietăți statistice care ar putea contribui în mod similar ca mijloace în transmiterea informației?Până acum, singura proprietate a mesajului folosită pentru a transmite informația a fost frecventa sa, în termeni > de impulsuri pe secundă, înțelegându-se că mesajul este un șir de impulsuri periodic sau aproape periodic.

In mod evident, ar putea fi utilizate și alte trăsături ale mesajului (statistic): într-adevăr, frecvența la care ne-am referit este proprietatea unui singur șir de impulsuri, în timp ce fiecare dintre nervii aferenți acestui șir e constituit dintr-un număr mare de fibre si fiecare dintre acestea > transmite numeroase șiruri de impulsuri. Prin urmare, este perfect plauzibil ca anumite relații (statistice) între astfel de șiruri de impulsuri să transmită, de asemenea, informație. In acest sens, e normal să ne gândim la diverși coeficienți de corelare si la altele asemenea.

> >

Limbajul creierului, nu limbajul matematicii

Urmărind mai departe acest subiect, ajungem inevitabil la problema *limbajului.* După cum am arătat, sistemul nervos se bazează pe două tipuri de comunicare: cea care nu implică formalism aritmetic și cea care îl implică, de exemplu, comunicarea comenzilor (logice) și comunicarea

numerelor (aritmetice). Primul tip ar putea fi descris ca limbaj propriu-zis, cel de-al doilea - ca matematică.

Ar fi corect să înțelegem faptul că limbajul este în mare parte un accident istoric. Limbajele umane de bază ne sunt transmise în mod tradițional sub diverse forme, dar însăsi multitudinea lor dovedește că nu există nimic abso- > > lut și necesar în legătură cu ele. Exact așa cum limbi precum greaca și sanscrita sunt fapte istorice și nu necesități logice absolute, este rezonabil să presupunem că logica și matematica sunt, în mod similar, forme de exprimare istorice și accidentale. Acestea pot avea variante esențiale, adică pot exista în alte forme decât cele cu care suntem obisnuiti. Intr-adevăr, natura sistemului nervos central si a sistemelor de mesaje pe care le transmite indică în mod clar că asa stau lucrurile. Am strâns acum suficiente dovezi pentru a ne da seama că, oricare ar fi limbajul pe care îl folosește sistemul nervos central, acesta este caracterizat de mai puțină adâncime logică și aritmetică decât suntem obișnuiți în mod normal. Iată un exemplu clar în acest sens: retina ochiului uman realizează o reorganizare considerabilă a imaginii vizuale percepute de ochi. Această reorganizare este efectuată pe retină sau, mai precis, în punctul de intrare al nervului optic, cu ajutorul a doar trei sinapse succesive, adică în termenii a trei pași

logici consecutivi. Caracterul statistic al sistemului de mesaje folosit în aritmetica sistemului nervos central și precizia lui scăzută indică, de asemenea, faptul că degenerarea preciziei, descrisă anterior, nu poate merge prea departe în cadrul sistemelor de mesaje despre care vorbim. In consecință, aici există structuri logice diferite de cele care se folosesc în mod obișnuit în logică și matematică. Așa cum am scos în evidență anterior, ele sunt caracterizate de mai puțină adâncime logică și aritmetică decât cea cu care suntem obișnuiți în situații similare. Astfel, logica și matematica din sistemul nervos central, atunci când sunt privite ca limbaje, trebuie să fie, din punct de vedere structural, cu totul diferite de limbajele la care se referă experiența noastră obișnuită.

De asemenea, trebuie remarcat faptul că limbajul în cauză ar putea corespunde mai degrabă unui cod scurt, în sensul descris anterior, decât unui cod complet: atunci când discutăm matematic, s-ar putea să vorbim un limbaj *secundar,* construit peste limbajul *primar* folosit cu adevărat de sistemul nervos central. Astfel, formele exterioare ale matematicii *noastre* nu sunt absolut relevante din punctul de vedere al evaluării identității limbajului matematic sau logic folosit cu *adevărat* de sistemul nervos central. Totuși, remarcile anterioare legate de siguranța și de adâncimea logică și aritmetică dovedesc că, oricare ar fi sistemul, acesta nu poate

să nu difere considerabil de ceea ce considerăm
noi, în mod conștient și explicit, a fi matematică.